

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

MODELOS NUMÉRICOS EN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. JOSÉ DOMÍNGUEZ ABASCAL

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 28 DE FEBRERO DE 2012

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. ENRIQUE ALARCÓN ÁLVAREZ



MADRID MMXII

Editado por la Real Academia de Ingeniería

© 2012, Real Academia de Ingeniería

© 2012 del texto, José Domínguez Abascal y Enrique Alarcón Álvarez

ISBN: 978-84-95662-48-4

Depósito legal: M-6.345-2012

Impreso en España

MODELOS NUMÉRICOS EN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA

Oí hace años decir a D. Pedro Laín Entralgo, que: “bien nacido es quien identifica y reconoce lo que otros hicieron por él para que pudiera alcanzar la posición que ocupa”.

Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Ingeniería,
Excelentísimas Señoras y Excelentísimos Señores Académicos,
señoras y señores, amigos:

Quiero en primer lugar, y desde la alegría que me inunda, hacer llegar mi agradecimiento a quienes generosamente me han elegido para ser miembro de esta alta institución. Seguramente, el honor que me hacen es el más alto reconocimiento al que puede aspirar un ingeniero en su propio país. Me eligieron ustedes en virtud de unos méritos que, obviamente, no me corresponde confirmar ni poner en duda; me limito únicamente a relativizarlos. Espero no defraudar su confianza.

No quiero tampoco dejar de recordar hoy a las muchas personas que me han ayudado en el discurrir de la vida. Si convocara a todos ellos en este discurso no haría en él otra cosa que dar las gracias.

De mi madre aprendí a valorar dos virtudes que ella poseía muy por encima de cualquiera de sus ocho hijos: la bondad y la inteligencia. De mi padre, más que cualquier otra cosa, el valor del esfuerzo y el trabajo. Nos lo transmitió no sólo con su ejemplo, sino con su insistencia permanente. Creo que la frase que más veces le oí en toda mi vida, fue, la que inevitablemente me decía siempre que me veía y no estaba estudiando: ¡José!, ¿ya te lo sabes todo?

Esos mismos valores, que traté de asimilar como propios, los encontré en el colegio de Jesuitas al que me enviaron mis padres y en el que permanecí hasta finalizar el curso preuniversitario.

Ya en mi vida universitaria traté de seguir el camino que me marcaron mis mayores y de manera más cercana que nadie, mi hermano Jaime, que al ser dos años mayor que yo y estudiar en la misma Escuela, me enseñó un sin fin de cosas, entre ellas como evitar no pocos tropezones en los primeros años de carrera. De Javier Aracil aprendí en aquella joven Escuela como debe ser un profesor universitario.

Al terminar la carrera tuve la fortuna de poder comenzar el doctorado con Enrique Alarcón. Desde aquel ya lejano mes de julio del año 75, Enrique Alarcón ha sido un ejemplo académico, científico y, más aún, personal. Alarcón a lo largo de estos 37 años me ha concedido el privilegio de ser un maestro excepcional y mi amigo.

El Profesor Brebbia en la Universidad de Southampton y el Profesor José Manuel Roësset durante el post-doc en MIT, jugaron un papel de gran importancia en mi carrera profesional. Sin todos ellos, con seguridad no estaría hoy en este lugar. Aún desde la torpeza, el solo hecho de seguir sus ejemplos debería haber producido algunos buenos resultados.

En una universidad en la que las palabras maestro y discípulo están con frecuencia mal vistas, e incluso en la que las de profesor y alumno han sido sustituidas por personal docente y estudiante, me gusta reivindicar el papel de ambos comparando el proceso de creación de conocimiento científico y técnico con la construcción de una gran obra de piedra. En ella, una persona experta que sabe dónde hay que colocar cada piedra, dirige a alguien que tiene la fuerza y el ímpetu suficiente para colocarlas. Creo que la mayor parte del conocimiento científico y técnico más destacado surgido de las instituciones académicas, se genera de esta forma. A todos mis discípulos, que siendo más fuertes que yo han colocado conmigo muchas de estas piedras, muchas gracias.

Por último, y sobre todo, quiero dar las gracias a mis hijos Beatriz y Pelayo que tantas veces tuvieron que comprender que su padre pasara menos tiempo con ellos del que todos hubiéramos deseado.

Recibo hoy la medalla número XXI de esta Real Academia de Ingeniería; medalla que perteneció a Antonio Barrero Ripoll. Y crean que me siento conmovido y abrumado por ello. Conmovido porque Antonio

era mi amigo; abrumado porque su valía personal y científica son muy difícilmente alcanzables.

Antonio Barrero dedicó su gran inteligencia y todo su esfuerzo, que fue mucho, a la enseñanza y el desarrollo de la ingeniería en España. Creyó en la excelencia como principio fundamental del ser universitario. Como profesor, como científico e incluso como empresario, Barrero hizo una contribución a la ingeniería que difícilmente encontraremos en otras personas, y que trasciende con mucho al mundo académico. Su huella permanece no solo en sus publicaciones en las mejores revistas, sino en sus discípulos y colegas que tuvimos el privilegio de compartir con él lecciones y conversaciones. El contacto con sus ideas brillantes y su defensa apasionada de las mismas, nos ha hecho a muchos un poco mejores.

Como es costumbre en estas circunstancias, me gustaría decirles unas palabras sobre un tema de mi especialidad en el que he trabajado durante años. Dedicaré pues, una parte significativa de esta intervención, a mostrarles algunos estudios sobre el comportamiento dinámico de estructuras en las que la interacción con el suelo juega un papel importante, en su respuesta ante solicitaciones que varían rápidamente a lo largo del tiempo.

Problemas tales como: el del comportamiento de una turbina generadora de electricidad, la respuesta sísmica de un gran edificio, la de una presa o la de una central nuclear, o el comportamiento dinámico de un tren cuando circula a 300 km/h, tienen en común que ninguno de ellos puede ser analizado estudiando aisladamente la turbina, el edificio, la presa, la central o el tren, sino que cualquiera de ellos debe estudiarse como un sistema acoplado donde intervienen, la estructura de referencia y el suelo que la soporta. En todos ellos, la propagación de ondas en el suelo juega un papel primordial en el comportamiento del sistema y por tanto, en el de la estructura.

Me gustaría igualmente, dedicar la última parte de mi intervención a algo, que siendo distinto de lo anterior, no es ajeno a cualquier actividad investigadora llevada a cabo por un universitario. Trataré brevemente sobre el papel que juega la universidad en la creación del conocimiento científico y técnico, y en su puesta en valor al servicio de la

sociedad. En esta institución he desempeñado casi toda mi carrera profesional. A su gestión como Vicerrector, como Director de una Escuela de Ingenieros y como Secretario General en la Junta de Andalucía, dediqué intensos años de mi vida profesional.

Vayamos por partes. Comencemos por la interacción dinámica suelo-estructura. Denominamos así a los fenómenos de interacción de fuerzas, y acoplamiento de movimientos, que se producen entre el suelo y las estructuras que, unidas a él, están sometidas a sollicitaciones dinámicas. Esto es, sollicitaciones que varían con la suficiente rapidez como para hacer significativas las fuerzas de inercia.

Durante mucho tiempo, las estructuras fueron calculadas exclusivamente en su comportamiento estático, con independencia del tipo de cargas a que se vieran sometidas. Como mucho, cargas claramente variables eran representadas por un valor constante más o menos equivalente, lo cual no siempre resultaba realista. El estudio de la dinámica parecía algo ajeno a las estructuras; algo propio de la mecánica general. En nuestro país, esta división fue aún más acusada que en el resto de Europa y puede decirse que el primer libro español dedicado a la dinámica de estructuras¹ es el titulado, “Elementos de Dinámica Aplicada a las Estructuras” que Miguel Hacar y Enrique Alarcón publican en 1971.

Permítanme una referencia especial a este maravilloso libro que Alarcón me regaló y sugirió que leyera en 1975. En él se encuentran estudiadas, no solo las cuestiones generales de la dinámica de sólidos y estructuras, sino un sinnúmero de problemas de esta materia abordados desde la profundidad y el rigor.

El primer estudio que podríamos identificar como de dinámica de estructuras en la historia de la ingeniería, es el presentado por Euler² en 1766. En su memoria “De Sono Campanarum”, Euler trata las vibraciones en la lámina que conforma una campana considerando esta como un haz paralelo de barras circulares. El estudio, especialmente brillante como todos los del gran matemático suizo, contiene grandes aproximaciones puesto que fue escrito casi sesenta años antes de que Navier³ estableciera las ecuaciones generales de la elasticidad en 1821.

Navier, Cauchy, Poisson, Saint-Venant, Coulomb, Kelvin, Kirchhoff, Stokes, y otros, forman el grupo de grandes científicos que durante el siglo XIX llevan a cabo uno de los desarrollos más bellos y elegantes de las ciencias de la ingeniería, el de la teoría de la elasticidad. Una vez formuladas las ecuaciones generales, Poisson⁴ y Cauchy⁵ establecen en 1828, las que gobiernan el comportamiento de las placas, y Kirchhoff⁶ formula en 1850 las condiciones de contorno de tal manera que permiten la resolución matemática de aquel problema.

Este desarrollo no es sólo relativo a la estática sino que Poisson⁷ en 1831, Ostrogradsky⁸ en el mismo año, y Stokes⁹ en 1849, identifican los dos tipos de ondas que pueden producirse en los sólidos elásticos, así como el carácter irrotacional de unas y equivoluminal de las otras. A finales del siglo, en 1887, Lord Rayleigh¹⁰ identifica el tercer tipo de ondas, este asociado a la superficie y que es conocido con el nombre de su descubridor.

El siguiente gran salto en el desarrollo de la dinámica de estructuras tiene lugar a partir de los años 50 del siglo XX y está asociado a la irrupción del ordenador, los métodos numéricos y la ingeniería sísmica. Profesores ingenieros como Nathan Newmark o Ray Clough son responsables del desarrollo de métodos de cálculo que hacen posible construcciones como la Torre Latinoamericana de la ciudad de México en 1956, la llamada Manhattanización de San Francisco y Los Ángeles ocurrida desde final de los años cincuenta hasta principios de los ochenta, y la construcción de un gran número de centrales nucleares en diversos lugares del mundo.

La construcción segura de estas grandes obras fue posible no sólo gracias al desarrollo de la dinámica de estructuras sino también, al necesario entendimiento de la interacción dinámica existente entre suelo y estructura. En obras como grandes presas, edificios altos o centrales nucleares, esta interacción juega un papel principal e influye decisivamente en el comportamiento del sistema.

La importancia y complejidad de los fenómenos de interacción dinámica suelo-estructura había comenzado a ponerse de manifiesto en el estudio de cimentaciones de turbinas y grandes máquinas en la Ale-

mania de los años 30 del siglo pasado. Este hecho conduce a Reissner¹¹ a presentar algunas soluciones aproximadas para la impedancia dinámica de cimentaciones ya en 1936. Con anterioridad habían coexistido como disciplinas aisladas, por una parte la dinámica de máquinas y por otra la propagación de ondas en el suelo, particularmente por sus aplicaciones en sismología.

Los estudios de Reissner y otros posteriores, ponen claramente de manifiesto que cualquier modelo que pretenda representar de manera realista el comportamiento dinámico de grandes estructuras unidas al suelo, debe incluir como un único sistema a esta y el suelo que la soporta, es decir, debe tener en cuenta la interacción entre ambos. Para ello se dispone desde 1957 del método de los Elementos Finitos¹², una maravillosa herramienta, que unida al progresivo aumento de la capacidad de cálculo computacional, cambió durante las últimas décadas del siglo XX el mundo del cálculo de estructuras y el de otras ramas de la ingeniería.

No obstante la gran capacidad y versatilidad de este Método, en problemas dinámicos donde interviene el suelo se produce una dificultad para su aplicación derivada del hecho de tener que representar como finito un medio que es infinito en comparación con el tamaño de cualquier estructura. Esta dificultad, que en estática se resuelve con la simple interrupción de la discretización del suelo a una cierta distancia de la estructura, no podía resolverse igualmente en dinámica ya que siempre aparecerían reflexiones espurias en los bordes artificialmente añadidos. El problema, intrínseco al Método, se resolvió de manera no siempre satisfactoria a base de mecanismos de absorción de energía ubicados en los contornos, o mediante formulaciones aproximadas de la transmisión de ondas más allá de los límites del modelo finito. Son muy notables en este terreno las aportaciones de Waas¹³, y Kausel y Roesset¹⁴.

Una solución natural del problema vendría poco después, de la mano del Método de los Elementos de Contorno. En este otro método numérico, la solución de las ecuaciones del continuo se plantea en términos de ecuaciones integrales sobre el contorno, haciendo uso de una solución fundamental correspondiente a una carga concentrada en un

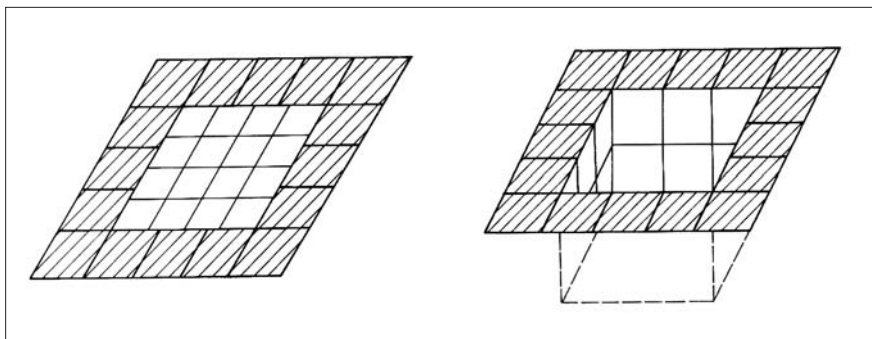


Figura 1. Mallas de Elementos de Contorno para el estudio de impedancias dinámicas de cimentaciones.

punto del medio infinito. Esto conduce a dos características del método especialmente relevantes para los problemas de dinámica de suelos: por una parte, sólo es necesaria la discretización de la superficie del problema en estudio, y por otra, esta discretización puede truncarse sin error importante en un lugar poco alejado de la zona de interés. El truncamiento de la malla no producirá reflexiones espurias al ser las condiciones de radiación automáticamente satisfechas por la propia solución fundamental.

En la Figura 1 se muestran las discretizaciones que fueron empleadas para resolver por primera vez un problema de interacción dinámica suelo- estructura mediante el Método de los Elementos de Contorno. Con estas simples mallas con un total de 32 y 61 nodos, respectivamente, pudieron calcularse con la precisión adecuada, las rigideces dinámicas de grandes cimentaciones cuadradas descansando en la superficie o embebidas en el suelo. Las figuras corresponden a una publicación¹⁵ del Departamento de Ingeniería Civil de MIT, del año 1978, escrita por quien les habla y que llevé a cabo bajo la supervisión del profesor Roesset.

Un problema muy diferente por su complejidad, es el del comportamiento sísmico de una presa tipo bóveda (Figura 2). El comportamiento de la presa solamente puede analizarse de una manera realista, estudiando el sistema acoplado que forman: presa, embalse, y la roca sobre la que se asientan. Se producen interacciones entre los tres medios y las solicitaciones a que se ve sometida la presa dependen de factores



Figura 2. Presa y embalse de Morrow Point (Parque Nacional del Cañón Negro, río Gunnisson, Colorado, USA).

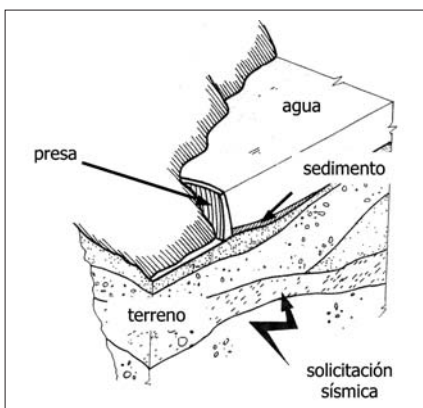


Figura 3. Esquema del problema.

tales como (Figura 3): las propiedades de la roca, la topografía cercana, las propiedades geológicas del entorno, el ángulo de incidencia y tipo de ondas del terremoto, el nivel de llenado del embalse, la geometría del vaso, la presencia de sedimentos de fondo, su geometría y propiedades, y algunos otros elementos, además obviamente de la geometría y propiedades estructurales de la presa.

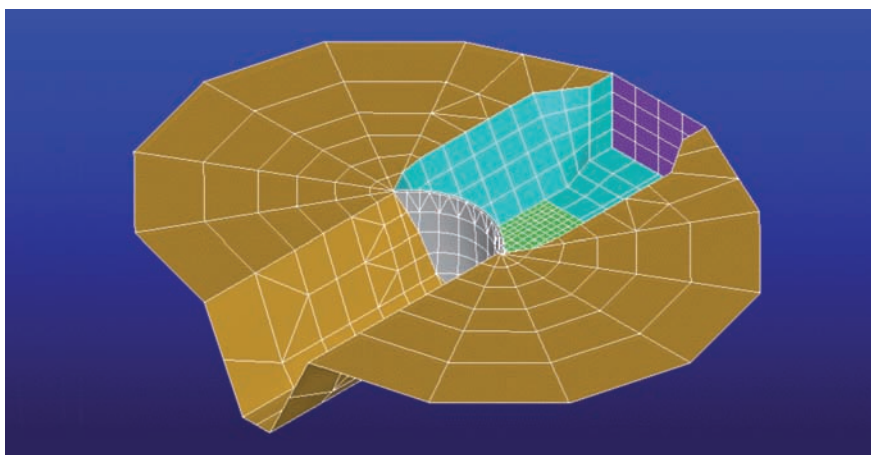


Figura 4. Modelo de Elementos de Contorno cuadráticos para el estudio de la respuesta sísmica de una presa de tipo bóveda.

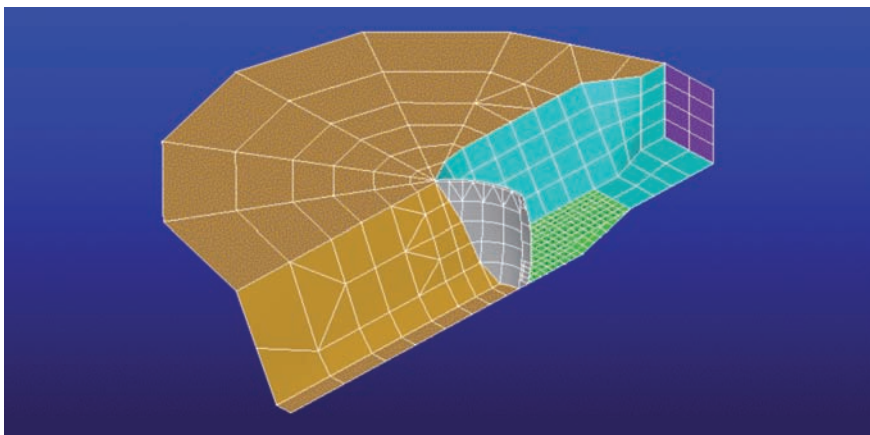


Figura 5. Sección del modelo anterior.

En las Figuras 4 y 5 puede verse un modelo de Elementos de Contorno que empleé con varios de mis discípulos para el estudio de la respuesta sísmica de la presa de Morrow Point en Colorado. Les muestro esta presa por haber sido utilizada como referencia en algunas publicaciones sobre el tema¹⁶ en las que se emplea el Método de los Elementos Finitos.

El modelo de Elementos de Contorno requiere la discretización de las superficies de la presa, la de la roca hasta una cierta distancia del embalse, y las interfaces con agua y sedimentos (Figura 6). El tener que dis-

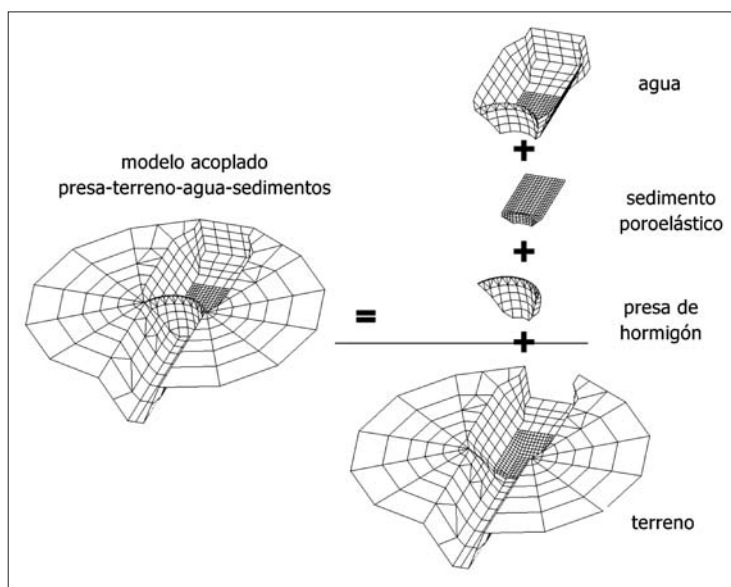


Figura 6. Subregiones y estrategia de acoplamiento en el modelo de Elementos de Contorno.

cretizar únicamente las superficies y no los dominios tridimensionales, como ocurre en el caso de Elementos Finitos, simplifica enormemente el problema. Este hecho, junto con el de incluir la radiación de ondas hacia el campo lejano de una manera natural y exacta, permite una representación de la geometría real del embalse y el nivel de llenado de este, así como tener en cuenta el efecto de la distribución espacial de la solicitación sísmica. Igualmente se puede representar el movimiento sísmico por un conjunto de ondas de distinta naturaleza, que forman diversos ángulos al incidir sobre la presa.

En el modelo se tiene en cuenta de manera precisa la interacción entre los distintos medios reseñados, incluyendo los sedimentos de fondo. Estos sedimentos, que tienen un efecto amortiguador importante, son representados mediante una formulación integral¹⁷ que incluye su comportamiento como un medio poroso saturado o cuasi-saturado de acuerdo con la teoría de Biot.

Téngase en cuenta que los modelos existentes hasta la aparición del que se muestra aquí, debían suponer un embalse de sección uniforme hasta el infinito y una roca sin masa que permitiera evitar las reflexiones espurias en el contorno, lo cual también conducía a no poder considerar el efecto de la interacción múltiple o de la distribución espacial de la onda incidente, ya que una masa nula equivale a una longitud de onda infinita. Esta última aproximación, en presas con dimensiones que son

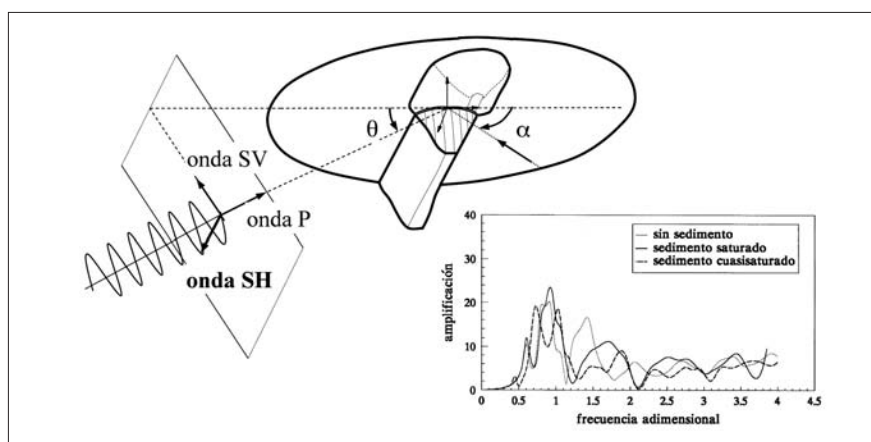


Figura 7. Función transferencia correspondiente a la aceleración anteroposterior del punto medio de la coronación de la presa.

del mismo orden que la longitud real de las ondas sísmicas, conduce a una representación grosera de la realidad.

La influencia de todos estos factores puede ser analizada a través de estudios paramétricos haciendo uso del modelo que se presenta, y todos ellos pueden tenerse en cuenta para cualquier sistema roca-presa-embalse.

A modo de ejemplo puede verse en la Figura 7 el valor de la aceleración en el punto medio de la coronación de la presa antes mencionada en re-

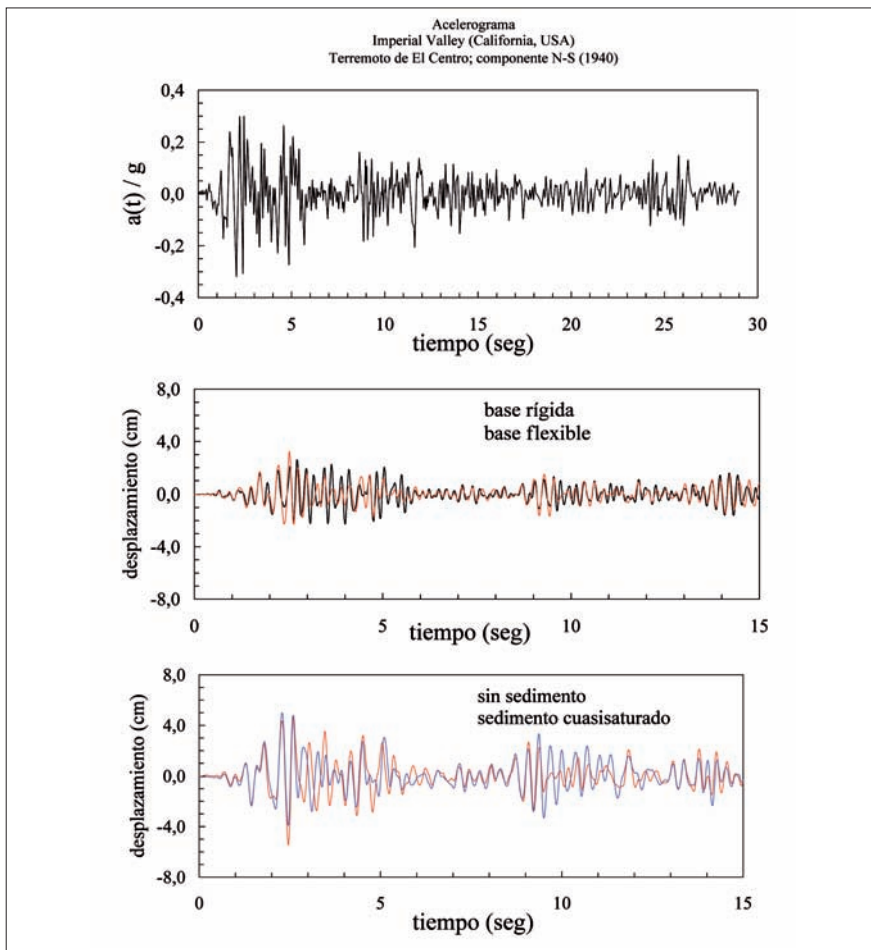


Figura 8. Acelerograma del terremoto de El Centro y respuesta transitoria de desplazamientos en punto medio de la coronación. Influencia de la interacción suelo-estructura y de la presencia de sedimentos de fondo.

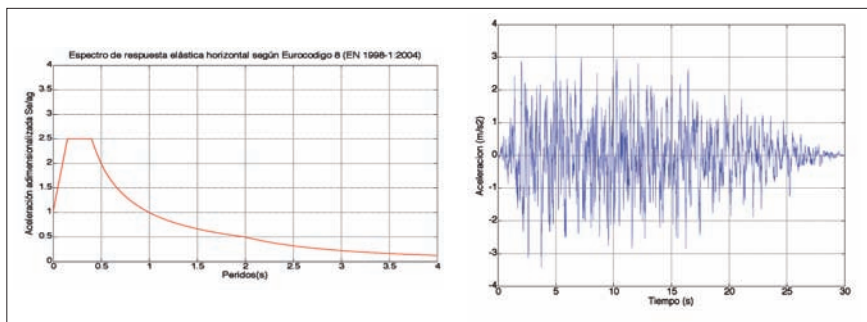


Figura 9. Espectro de diseño según EC-8 (EN 1998-1:2004) para base rocosa y terremoto artificial compatible ($a_g = 0.35 \text{ g}$).

lación a la aceleración de campo libre del movimiento sísmico incidente y supuesto un tren de ondas armónicas de tipo equivoluminal incidiendo verticalmente sobre el lugar. Se representa esta amplificación, en función de la frecuencia y según haya o no sedimentos de fondo, con un espesor igual a la décima parte de la altura de llenado, así como de las propiedades de este sedimento debidas a su grado de saturación.

Igualmente puede considerarse el modelo cuando es sometido a un terremoto conocido como el que corresponde al acelerograma de la Figura 8.a. La respuesta en el punto medio de la coronación puede observarse en las Figuras 8. b y 8. c, dependiendo de que se considere la roca como infinitamente rígida o con las propiedades de un granito, o que existan o no sedimentos de fondo.

Puede observarse en la Figura 9, el espectro de respuesta de diseño definido en el vigente Eurocódigo, y un acelerograma de un terremoto sintético que tiene ese espectro de respuesta. En la Figura 10, se presenta el espectro obtenido para el punto de la presa indicado, para distintas condiciones de llenado del embalse, suponiendo un tren de ondas con el espectro de la Figura 9, e incidiendo verticalmente de tal manera que produce un movimiento anteroposterior de la presa.

Pasemos ahora a analizar brevemente un segundo problema de gran importancia y en el que son importantes los fenómenos de interacción dinámica suelo-estructura. Es el caso de los trenes de alta velocidad, los cuales en su avance generan ondas en el suelo cuyos efectos en el entorno deben predecirse y limitarse. Estas ondas en el suelo influyen a

su vez en el propio movimiento del tren.

Es conocido desde los estudios de Lamb¹⁸ de 1904, que la aplicación de una carga instantánea sobre la superficie de un semiespacio elástico, produce en él ondas irrotacionales (conocidas como ondas P de “Primae” al ser las primeras que llegan a un punto de observación), ondas equivolumentales (conocidas como ondas S de “Secundae” pues llegan después de las P) y ondas superficiales que son algo más lentas y son conocidas como ondas de Rayleigh. Los tres tipos pueden verse en la Figura 11. Las velocidades de propagación de estas ondas, c_p , c_s , y c_R , respectivamente, son

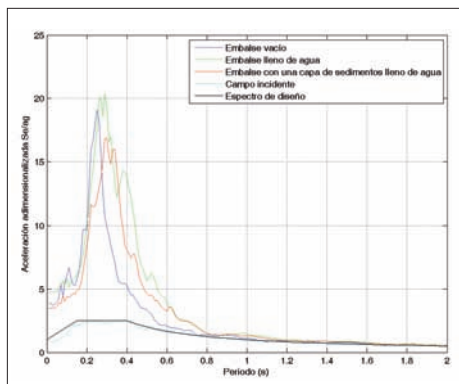


Figura 10. Espectro respuesta máxima pseudo-aceleraciones nodo bóveda. Influencia del nivel de llenado del embalse y de los sedimentos de fondo.

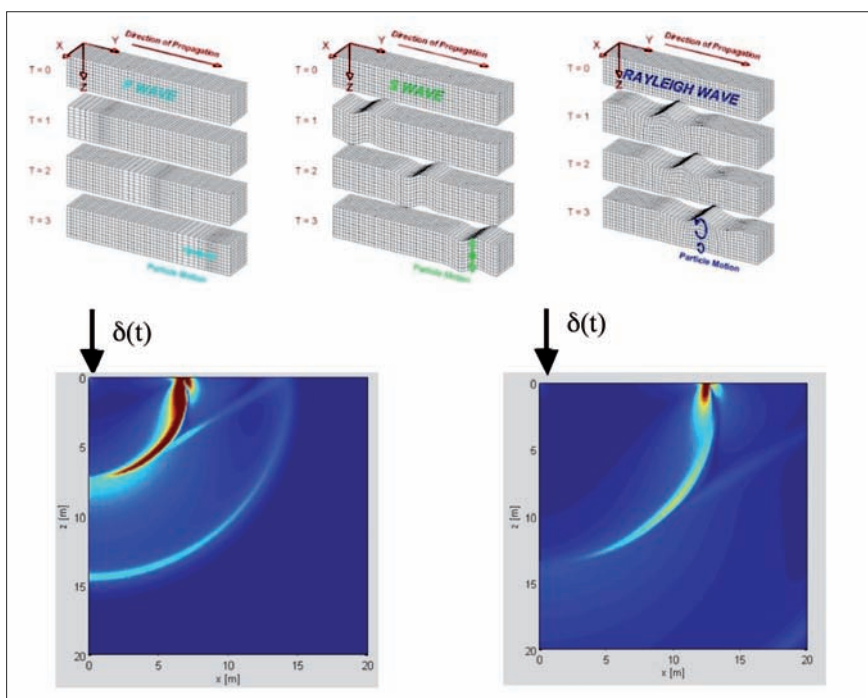
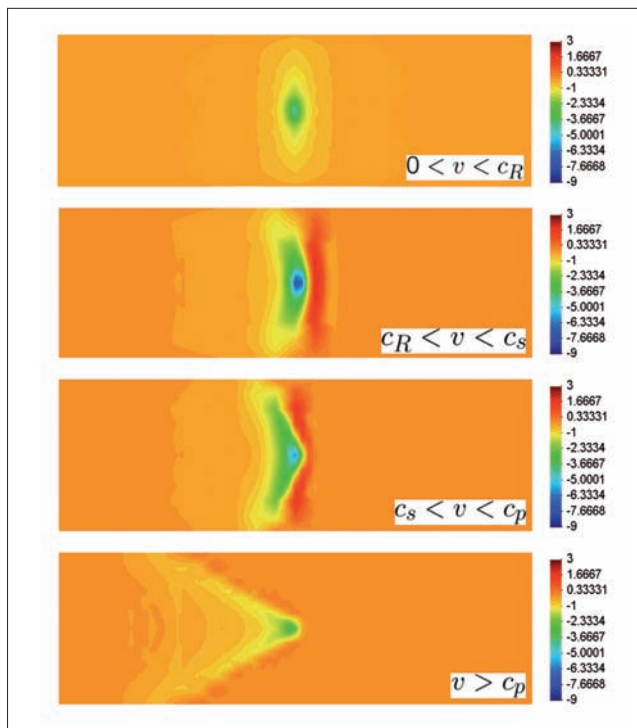


Figura 11. Propagación de ondas en el suelo.

Figura 12. Vibraciones causadas en el suelo por una carga móvil.



una característica propia del material en el que se propagan, dependiendo de sus propiedades mecánicas. Así, los materiales cuanto más rígidos y ligeros conllevan unas velocidades más altas de propagación de ondas.

Cuando un tren se desplaza a gran velocidad sobre la vía, genera ondas en el suelo por dos causas fundamentalmente. Por una parte, el deslizamiento a gran velocidad de una carga aplicada sobre la superficie del suelo, genera una perturbación en forma de ondas que se propagan sobre la superficie y el interior del suelo. Es algo parecido a lo que ocurriría en el agua de un recipiente si hacemos correr un dedo apoyado levemente sobre su superficie.

Dependiendo de la velocidad a la que viaja la carga aplicada sobre la superficie del suelo, en relación con las velocidades de propagación de las ondas que es propia del suelo, el efecto será muy diferente. En la Figura 12 puede apreciarse una representación del desplazamiento vertical en la superficie del suelo para cuatro velocidades distintas de

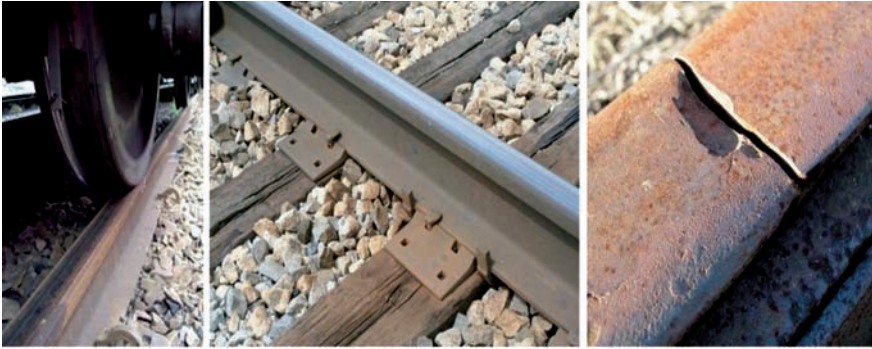


Figura 13. Mecanismos de sollicitación.

la carga: una velocidad inferior a la de las ondas de Rayleigh, una comprendida entre esta y la velocidad de las ondas S, una comprendida entre la de las ondas S y la de las ondas P, y por último, una superior a la velocidad propia de las ondas P.

Se aprecia cómo se genera un distinto nivel de perturbación en el suelo según aumenta la velocidad de la carga y como va cambiando la geometría de la perturbación al superar cada una de las velocidades hasta llegar a la típica geometría del cono de Mach. Los resultados de la figura fueron obtenidos con una malla superficial de 216 elementos de contorno con aproximación cuadrática de los movimientos en cada elemento.

La superación de las velocidades características de las ondas en el suelo por un tren de alta velocidad daría lugar a grandes inestabilidades en su movimiento. Este fenómeno, impensable en trenes convencionales, se produjo en un tren de alta velocidad desplazándose por una vía sobre un suelo poco rígido en la línea de la costa oeste de Suecia en 1999¹⁹. Es obvio que tal situación debe ser prevista y evitada durante la construcción de la línea, lo cual sólo es posible con un buen conocimiento del terreno y un buen modelo capaz de representar la situación.

Además de la causa reseñada, el desplazamiento de un tren genera perturbaciones y por tanto ondas en el suelo, como consecuencia de las irregularidades de las ruedas, el carril, y la no continuidad del apoyo sobre la traviesas (Figura 13).



Figura 14. Vibraciones causadas por el paso del ferrocarril.

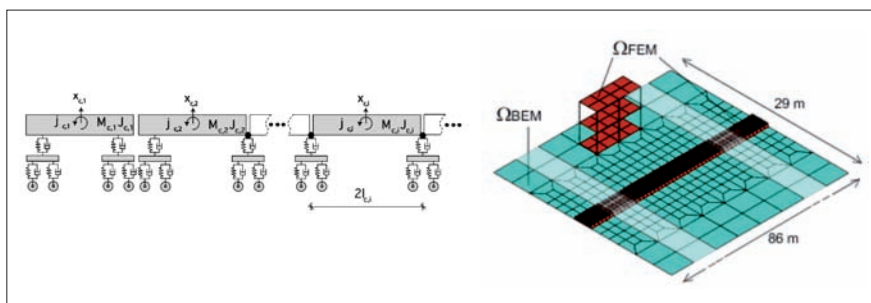


Figura 15. Formulación del modelo.

El modelo empleado para estudiar el problema, tanto de las vibraciones en el suelo como en construcciones cercanas y en el propio tren (Figura 14), consta de: una representación multicuerpo para el tren con sus distintos elementos suspendidos y no suspendidos; elementos de contorno para el suelo; y elementos finitos para el carril, las traviesas, el balasto y las estructuras cercanas a la vía (Figura 15).

Distintos tipos de plataforma y vía se representan de forma diferente según se trate de vía sobre balasto o placa (Figura 16). Infraestructuras como puentes, pasos inferiores o túneles son representados con discretizaciones de elementos de contorno o elementos finitos según el caso.

Las propiedades del suelo se pueden obtener con gran precisión mediante ensayos dinámicos empleando el Método de Análisis Espectral

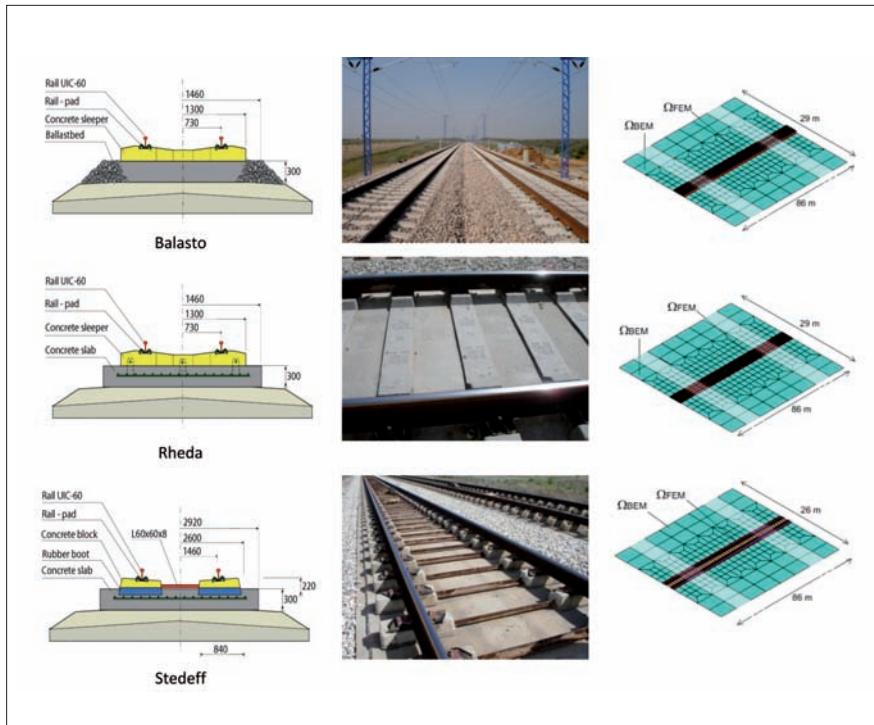


Figura 16. Comportamiento de diferentes tipos de vías.

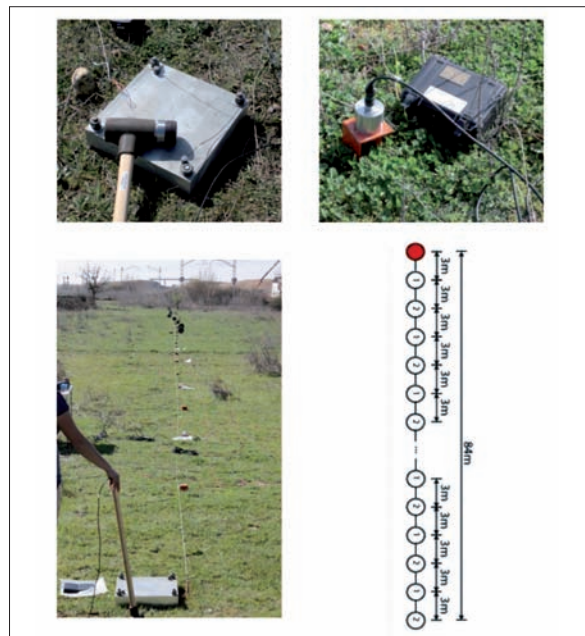


Figura 17. Identificación de las propiedades dinámicas del suelo.

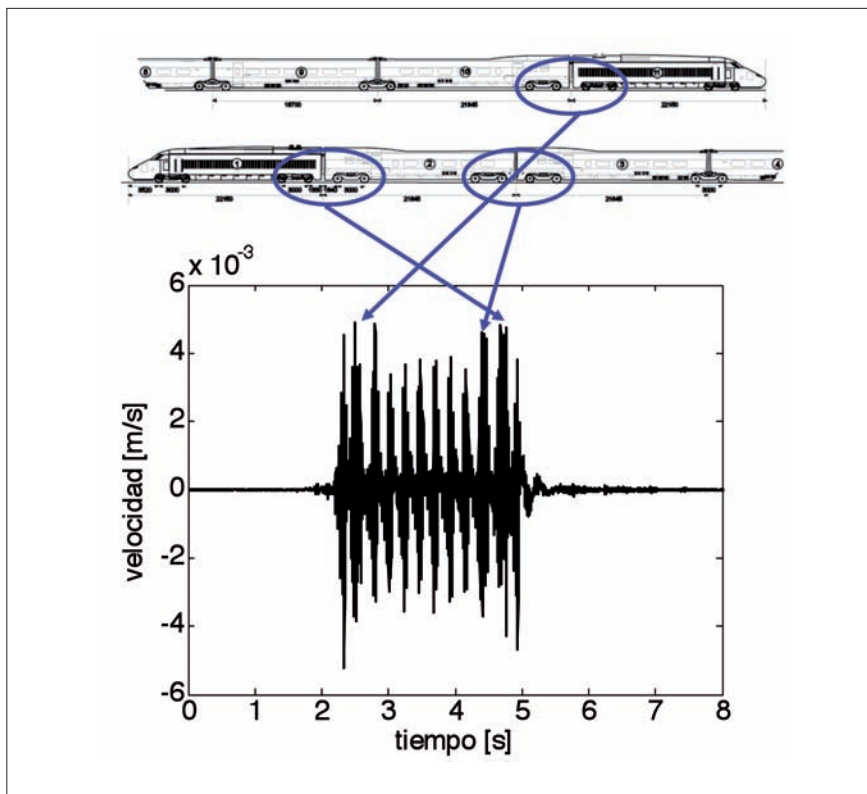


Figura 18. Vibraciones ocasionadas por el paso de un TAV Alstom a 298 km/h a 3 m de la vía.

de Ondas Superficiales. Para llevar a cabo el ensayo se golpea el suelo con un mazo de impacto calibrado y se disponen acelerómetros uniaxiales a lo largo de una línea sobre la superficie (Figura 17).

Conocidas las propiedades en cada lugar, se realiza el modelo de elementos de contorno y elementos finitos al que antes aludía, y se representa el tipo concreto de tren que circula a una velocidad determinada teniendo en cuenta la ubicación concreta de cada eje a lo largo del tren así como la carga sobre cada vagón. Diferentes distribuciones de los ejes a lo largo del vehículo, como las que se dan en los distintos tipos de trenes actualmente circulando, producen una huella dinámica claramente diferente.

Las irregularidades de las ruedas y el carril, solo pueden tenerse en cuenta de una manera estadística ya que su geometría y distribución

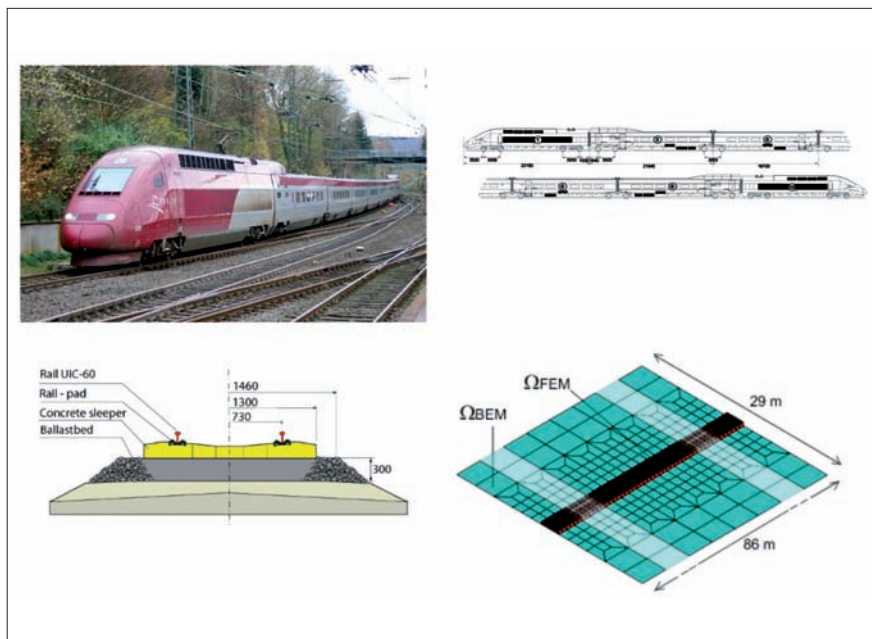


Figura 19. Estudio de la Línea de Alta Velocidad Bruselas-París.

será diferente para cada tren, y además variará a lo largo de la vida del mismo.

En la Figura 18, se representa la evolución en el tiempo de la velocidad en dirección vertical de un punto en la superficie del suelo situado a 3 metros del eje de la vía. El gráfico, calculado con el modelo aquí descrito, corresponde a un tren Alstom de los que circulan habitualmente entre Sevilla y Madrid desplazándose a 298 km/h. En la figura se pueden apreciar con claridad los picos de velocidad producidos por el paso sucesivo de cada uno de los ejes del tren.

Con el fin de validar el procedimiento, los resultados del análisis numérico pueden ser comparados con medidas experimentales obtenidas de situaciones reales. La primera de ellas corresponde al paso de un tren Alstom de la línea Bruselas-París para el que investigadores de la Universidad de Lovaina, con los que habitualmente cooperamos desde el Grupo de Estructuras de la Escuela de Ingenieros de Sevilla, habían medido vibraciones²⁰ en varios puntos a distintas distancias de la vía y una velocidad del tren de 315 km/h.

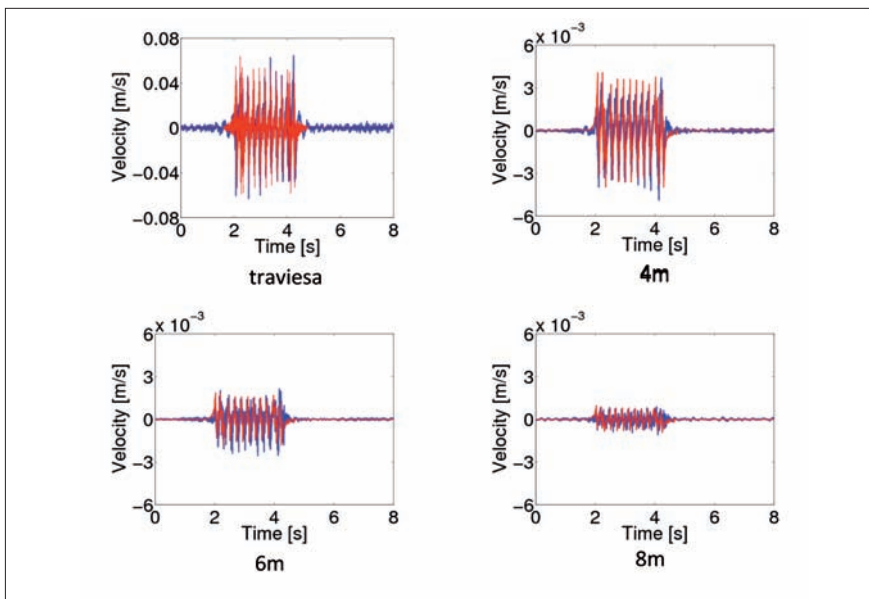


Figura 20. Validación experimental del modelo mediante los registros en la Línea de Alta Velocidad Bruselas-París.

Figura 21.
Instrumentación
en la Línea de Alta
Velocidad
Córdoba-Málaga.



El tren, el carril con sus elementos de amortiguación, la traviesa y la geometría del balasto se pueden ver en la Figura 19. Todos estos elementos son incluidos en el modelo numérico cuya parte más significativa, correspondiente a la discretización del suelo, carril, balasto y traviesa, puede verse en la misma figura.

En la Figura 20 se muestra la respuesta a distintas distancias de la vía. Los resultados numéricos y los experimentales se representan superpuestos con colores diferentes para cada uno de ellos. Debe entenderse que las vibraciones de alta frecuencia son debidas fundamentalmente a irregularidades del carril y las ruedas. Por esta razón, las calculadas numéricamente, nunca coincidirán del todo con la realidad ya que no se conoce la geometría verdadera de las irregularidades, la cual únicamente se puede definir de una manera estadística.

Un estudio similar en un lugar más próximo, fue realizado con un tren con una configuración parecida circulando por la línea Córdoba-Málaga. Se identificaron las propiedades del suelo y se ubicaron los acelerómetros necesarios para las medidas como se puede apreciar en la Figura 21.

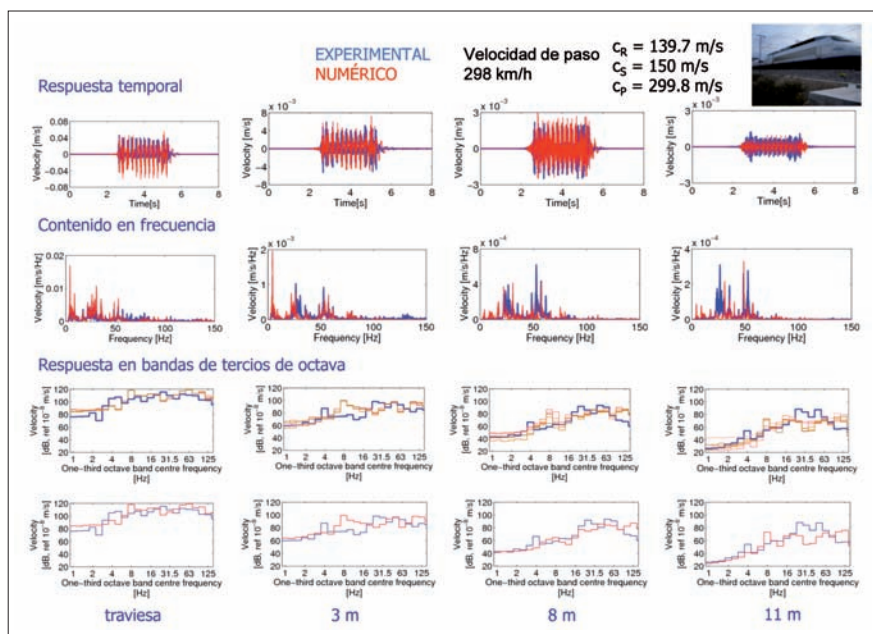


Figura 22. Validación experimental del modelo mediante los registros en la Línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga.

Los resultados experimentales medidos a distintas distancias de la vía cuando un tren Alstom circula sobre ella a 298 km/h son los mostrados con líneas azules en la Figura 22. Se han dibujado valores de velocidades en dirección vertical a lo largo del tiempo, su contenido en frecuencia, y su representación en decibelios en bandas de tercio de octava. En la misma figura, en color rojo, pueden verse representados los valores numéricos obtenidos con el modelo propuesto para el mismo problema.

Acabo de presentarles dos estudios sobre el comportamiento dinámico de sendos sistemas mecánico-estructurales. A estos, y otros problemas similares, he dedicado gran parte de mi vida como investigador. Ambos poseen la dosis de complejidad y rigor que exige el estudio de comportamientos no bien conocidos, al tiempo que responden a retos vigentes planteados por la ingeniería y cuya resolución debe contribuir a su avance y, consecuentemente, a la mejora del bienestar humano. En estos estudios puede apreciarse una muestra de cómo entiendo que debe ser, en buena medida, la contribución de la Universidad al desarrollo de la sociedad que la sustenta.

Dedicaré ahora unos minutos a reflexionar sobre cómo se ha producido históricamente la generación del conocimiento humano, y cuál es el papel de la universidad en su tarea de crear y transmitir este conocimiento, y con ello promover el desarrollo económico y social al que antes aludía.

Retrocederé considerablemente en el tiempo para poder tener una rápida perspectiva sobre la evolución en la forma de adquirir y aplicar los conocimientos científico/técnicos que ha acompañado al ser humano a lo largo de su existencia.

Hace aproximadamente 12.000 años se inicia una gran transformación de la humanidad con la aparición de la agricultura, el regadío, la domesticación de animales, la alfarería, los metales, y la formación de las primeras ciudades. Esta gran transformación tiene lugar impulsada por unos conocimientos técnicos que no son la obra de un puñado de inventores, pues sabemos que lo mismo ocurrió independientemente en diversos lugares y en distintos momentos. Fue el resultado de una evolución natural movida por la necesidad y el azar. Nadie se planteó

la cuestión de inventar, sino que de una manera inconsciente y espontánea se fueron encontrando soluciones que se transformaron en hábito, técnica, conocimiento, y cultura. Como decía Ortega en su "Meditación de la Técnica: "El primitivo no sabe que puede inventar". Es lo que él llamaba la "técnica del azar".

Esta forma azarosa de adquirir conocimiento va evolucionando a lo largo de los años hacia otras más estructuradas, hasta que ciencia y filosofía se unen a través de la lógica en la Grecia clásica, dando lugar a una forma más compleja de pensamiento que produce un gran avance de la ciencia y la técnica, primero en Grecia y posteriormente en Roma.

Tras aquel período fructífero, el acervo de conocimientos permanece más o menos inalterado durante cientos de años. Es transmitido dentro de los monasterios de Europa y alcanza un cierto mayor desarrollo en las culturas árabe y judía del sur del mediterráneo y Al-Andalus.

Tras renacer en los siglos XV y XVI, la ciencia, como caudal permanente de nuevo conocimiento, comienza su gran expansión en el siglo XVII con la Revolución Científica y el descubrimiento del Método Científico, es decir, el procedimiento para generar conocimiento; la manera de aprender a aprender.

En 1620 se publica el "Novum Organum" de Francis Bacon que describe el método inductivo, sintético: el que va de lo particular a lo general; y pocos años más tarde, en 1637, aparece el "Discurso del Método" en el que Descartes presenta el método deductivo, analítico: el que va de lo general a lo particular. Desde ese momento, lo más importante, con serlo mucho, no fue el saber muchas cosas nuevas sino el hecho de que el hombre moderno, en palabras de Ortega, "antes de inventar sabe que puede inventar". O como dice el propio Bacon: "lo más excelso es descubrir aquello por lo que todo lo demás puede ser descubierto con facilidad". El conocimiento científico crece ahora como nunca antes, impulsado por la existencia de un método para generarlo.

En este contexto, el desarrollo de la ciencia y la técnica es llevado a cabo por individuos aislados movidos por su curiosidad; pioneros que casi siempre disponían de otro medio para ganarse la vida lo cual les per-

mitía dedicarse al estudio para concebir la ciencia como un reto personal; cuando no como una pugna entre caballeros. Es conocido el hecho de que cuando Robert Hooke descubre su ley de los cuerpos elásticos, la escribió bajo la forma del famoso anagrama “ceiinossttuv” y como tal la envía a su rival Newton para desvelar sólo dos años después que el anagrama no era sino el resultado de ordenar alfabéticamente las letras de “Ut tensio sic vis” (Como el alargamiento, así es la fuerza). Frase que resume la ley que lleva su nombre.

Esta forma de desarrollo de la ciencia, y uno paralelo de la técnica que se sirve de aquella, produce grandes resultados durante los siglos XVII y XVIII, incluyendo una buena parte de los fundamentos de la mecánica de sólidos y estructuras, la ingeniería civil y la ingeniería mecánica. No obstante, los medios son aún escasos y los desarrollos, promovidos por individuos aislados, están acompañados de resistencias de todo tipo.

A principios del siglo XIX, se produce otro hecho que transforma significativamente la manera de desarrollar el conocimiento científico y técnico. En el año 1810 Wilhelm von Humboldt presenta su “Memoria sobre las Instituciones de Enseñanza Superior”. En ella identifica el conocimiento como: “algo enteramente por descubrir que debe ser incesantemente perseguido”. Con ello añade a la existencia del Método, una estrategia y unos medios, en definitiva una manera de organizarse para desarrollar el conocimiento.

Bajo estas premisas se crea en Berlín la primera universidad investigadora de la historia y con ello se introducen dos elementos que serían claves para el progreso de la ciencia y la técnica. En primer lugar, la ciencia se aloja, para quedarse, dentro de la Universidad de la cual se había mantenido alejada hasta entonces. En ella encuentra el lugar adecuado para su desarrollo en un clima de independencia y libertad. En segundo lugar, aparece el investigador como “trabajador del conocimiento”, como la persona a quien se remunera para que investigue.

A lo largo del siglo XIX se produce en Alemania un proceso de desarrollo del sistema universitario siguiendo el modelo de Berlín y en 1876 se traslada a los EE UU donde se crea la Johns Hopkins University como

primera “research university” del país. El modelo se consolida al otro lado del Atlántico y produce sus mejores resultados durante, y en los años posteriores a, la segunda guerra mundial. En esos años se consolidan los EE UU como primera potencia mundial, en gran medida en base a un sistema universitario donde se produce el conocimiento que hace posible el poder tecnológico, industrial, y económico del país.

Pero para que el sistema haya dado todos sus grandes resultados, ha tenido que producirse otro hecho más allá de la transformación de algunas universidades en instituciones investigadoras. La nueva forma de crear conocimiento que se da en los EE UU a partir de 1940, no es ya la debida únicamente a una universidad humboldtiana que ha reemplazado al individuo aislado, sino que es el fruto de una transformación adicional. La Universidad pasa a formar parte de un triángulo de alianzas en cuyos vértices se encuentran: (1) los intereses nacionales de los Estados Unidos; (2) las empresas donde los ingenieros hacen uso del conocimiento científico y técnico para las aplicaciones más diversas, y (3), las universidades investigadoras. Aparece así nítidamente lo que se ha llamado tercera misión de la Universidad.

Este modelo es claramente identificado y perseguido, y es aplicado hasta el punto de que el Presidente Eisenhower proclama en su discurso de despedida de la nación en 1961, que “el inventor solitario ha sido sustituido por ejércitos de científicos en laboratorios y campos de pruebas; la Universidad ha experimentado una revolución en la forma de hacer investigación; y el contrato con el gobierno se ha vuelto sustituto de la curiosidad intelectual”. Esta alianza entre gobierno, industria y universidades, que en la época a la que aludía Eisenhower fue aplicada fundamentalmente a la industria de la defensa, dio lugar posteriormente al desarrollo del conocimiento en los campos más diversos. Piénsese en la mecánica de la fractura, la ingeniería sísmica, la agricultura, la microelectrónica, la bío-medicina, la nano o la bío-tecnología, o la industria informática y de telecomunicación.

Los desarrollos logrados de esta forma han permitido en nuestros días, no solo la generación y aplicación sistemática del conocimiento, sino a una transformación general hacia la llamada sociedad del conocimiento. Una sociedad en la que el conocimiento crece de manera ex-

ponencial; en la que la información de todo tipo está disponible para todos; en la que la ciencia y la técnica tienen una gran incidencia social y cultural; y en la que la enseñanza universitaria de grado, extendida a más de la mitad de los jóvenes, juega un papel semejante al del bachillerato en la sociedad industrial. Las universidades dejan de ser un lugar de formación de élites para formar a los trabajadores de la sociedad del conocimiento. La enseñanza de grado se secundariza y la formación de las minorías se realiza en los estudios de postgrado y doctorado de lugares seleccionados.

Y en toda esta evolución del papel de la universidad en los últimos siglos ¿En qué medida ha participado la universidad española? ¿Dónde se encuentra nuestra universidad en esta nueva sociedad del conocimiento? Dedicaré los últimos minutos de mi intervención a una reflexión sobre estas cuestiones que tan directamente nos afectan.

En los doscientos años transcurridos desde la presentación de las ideas de Humboldt, las universidades españolas prácticamente no participan de la transformación que en ellas se propugna, y solamente se incorporan a esta forma de entender la universidad en los últimos treinta años.

Durante el siglo XIX y gran parte del XX, el desarrollo de la ciencia y la técnica españolas siguen siendo obra de individuos aislados movidos por la curiosidad. La principal evolución en este aspecto ocurrida hasta los años setenta del siglo XX consiste en que esta labor de pioneros, no se produce ya fuera de la universidad sino que transcurre en gran medida dentro de ella. Esto implica algunos medios adicionales respecto a los que podían conseguir los individuos por sí mismos, pero no una organización como la que preconizaba Humboldt, ni la presencia de personas a las que se les paga para que investiguen.

Tras un siglo XIX dominado por la convulsión política y social que hacen imposible cualquier desarrollo ordenado de la ciencia en España, aún en las primeras décadas del siglo XX, nuestros pensadores universitarios no tienen claro que deba emprenderse en la universidad un camino marcado por la investigación concebida y programada para ser fuente de desarrollo sistemático del conocimiento y de progreso.

En medio de un debate nacional sobre “los males de la patria” y la conveniencia de “europeizar España o españolizar Europa”, Unamuno, siendo por primera vez Rector de la Universidad de Salamanca, escribe en una carta a Ortega: “Es inútil darle vueltas, nuestro don es ante todo un don literario... Harto hacemos con procurar enterarnos de lo suyo. Su ciencia, su metafísica fecundarán nuestra literatura y ojalá nuestra literatura llegue a ser tal que fecunde su ciencia y su metafísica”. Esto ocurre en 1906, el mismo año en que un universitario español que responde al viejo modelo del pionero aislado, Santiago Ramón y Cajal, recibe el único premio Nobel que un científico haya recibido por investigaciones desarrolladas en España.

Y aún en 1912, en el epílogo de *El Sentimiento Trágico de la Vida*, el mismo Unamuno se reafirma escribiendo: “No ha mucho hubo quien hizo como que se escandalizaba de que yo dijese aquello de: ¡que inventen ellos!, expresión paradójica a la que no renuncio”. Y continúa diciendo: “los españoles debían seguir los sabios consejos que a los rusos daba el conde Maistre cuando les decía: no por no estar hecha para la ciencia, debe una nación estimarse en menos”.

Otros, como el propio Ortega tienen una visión más europea de España, pero ello no impide que éste conciba la universidad esencialmente como una institución para enseñar al estudiante medio a ser un hombre culto y un buen profesional. En 1930, en su “Misión de la Universidad” escribe entre las pocas reglas que han de regir la universidad: “No decidirá en la elección del profesorado el rango que como investigador posee el candidato”. Y separa claramente la misión fundamental de la universidad, la docente, de una colateral y distinta que es la del desarrollo de la ciencia.

El primer intento de convertir la ciencia en un elemento central y estructurado dentro de la universidad y la sociedad españolas, se produce con la Ley de la Ciencia de 1982, 170 años después de la creación de la Universidad de Berlín por Wilhem von Humboldt. Elementos como la creación de las OTRIs, la de los ministerios de Ciencia y Tecnología, y de Ciencia e Innovación por administraciones de distinto signo político, o la muy reciente Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, son importantes para avanzar en el camino del desarrollo

de la ciencia y la técnica, y en la creación del triángulo virtuoso que deben formar el mundo académico, la industria y las administraciones.

No obstante, la universidad española, de manera colectiva sigue siendo fundamentalmente, una institución gremial. Un lugar donde la necesidad de satisfacer los intereses de sus individuos, impide el establecimiento de unas prioridades reales y la definición de una estrategia científica que sea, como decía Humboldt, incesantemente perseguida por todos. Condiciones estas, necesarias para la generación de conocimiento científico y técnico en la dimensión que requiere un país desarrollado de nuestro tiempo. Un conocimiento que pueda ser aplicado al desarrollo social y económico dentro del citado triángulo.

Iniciativas recientes como Icrea en Cataluña, Ikerbasque en Euskadi o IMDEA en Madrid, no son más que intentos de llevar a cabo esta misión de la universidad sacando la gestión de la ciencia que hacen los universitarios, fuera de la propia universidad. Aunque pueda producir algunos buenos resultados, el modelo de trasladar gran parte de la misión de la universidad fuera de ella, está lastrado y es insuficiente.

Para que en España pueda darse la imprescindible participación de la universidad en una dimensión adecuada, en la creación de conocimiento científico y técnico, y en el consiguiente desarrollo tecnológico, económico y social, es imprescindible un cambio profundo en el sistema de gobierno de las universidades públicas que las haga responder a la misión requerida por la sociedad que las sustenta. Solamente así será posible alcanzar los niveles de desarrollo de ciencia y técnica que permitan la participación en competencia en un mundo en el que el conocimiento es la principal riqueza de los países.

Este es ya el final de mi exposición. Quiero terminar como empecé, dando las gracias a quienes me eligieron para estar aquí hoy, a quienes me ayudaron en el camino, especialmente a mi familia, y a todos ustedes por su atención.

Nada más. Muchas gracias.

Referencias

- ¹ Elementos de Dinámica Aplicada a las Estructuras, Edix, 1971
- ² Nov. Comm. Acad. Petropolitanae, t 10, 1766
- ³ Mém. de l'Acad, t 7, Paris 1827. Leída en Mayo de 1821
- ⁴ Mém. de l'Acad, t 8, Paris 1828
- ⁵ Exerc. de Mathematique, vol 3, 1828
- ⁶ J. f. Math. (Crelle), Bd. 40, 1850
- ⁷ Mém. de l'Acad, t 10, Paris 1831
- ⁸ Mém. de l'Acad, t 1, St. Petesburg 1831
- ⁹ Phil. Soc. Trans., Cambridge, 1848.
- ¹⁰ London Math. Soc. Proc., vol 17, 1887.
- ¹¹ Ingenieur Archiv., vol 7, 1936
- ¹² Turner, Clough, Martin y Topp; J. Aeron. Sciences, vol 23, 1956
- ¹³ Dept. Civil. Eng., UC Berkeley, PhD Thesis, 1972
- ¹⁴ R74-11, Civil Eng. Dept., MIT, 1974
- ¹⁵ R78-20, Civil. Eng. Dept., MIT, 1978
- ¹⁶ Tan y Chopra; Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol 24, 1995
- ¹⁷ Dominguez; J. Appl. Mech., ASME, 1991
- ¹⁸ Phil. Trans. R. Soc., vol 203, 1904
- ¹⁹ Adolfsson et al.; High speed lines on soft ground, Tech. Report, Banverket, 1999
- ²⁰ Degrande y Schillemans; J. Sound Vibr., vol 247, 2001

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. ENRIQUE ALARCÓN ÁLVAREZ

Excelentísimos miembros de la mesa presidencial,
señoras y señores,
queridos amigos:

Quiero comenzar agradeciendo a la Junta de Gobierno de la Real Academia de Ingeniería su amabilidad al designarme para responder el discurso de ingreso del profesor Domínguez Abascal, cuya trayectoria he seguido desde que él comenzaba su etapa como ingeniero y yo la mía como Catedrático de Universidad.

Con su generosidad y exuberancia características me adjudica la categoría de maestro orientador de su vocación. Al respecto voy a repetir, como en casos anteriores de ingresos en la R.A.I. de miembros del irrepetible grupo de personas extraordinarias que, comenzando por él, se reunieron en el bloque L-3 del antiguo edificio de la Escuela de Ingenieros de Sevilla, las palabras de Cajal: “La más pura gloria del maestro consiste, no en formar discípulos que le sigan, sino sabios que le superen”.

En el caso que nos ocupa su múltiple actividad, brillantísima en todos los desafíos que ha afrontado, pone de manifiesto que yo he cumplido estrictamente el mandato de Cajal.

Respecto a sus excesivas alabanzas al libro de Dinámica Aplicada que, junto con mi añorado padre intelectual Miguel Angel Hacar, comencé a escribir en 1971, solo cabe achacarlas al espíritu hiperbólico propio de los nacidos en su tierra. Desde luego, en lo que respecta a mi contribución a aquella obra debo reconocer que es otra confirmación del aforismo que asegura: “Quien sabe mucho investiga, quien sabe poco enseña y quien no sabe nada escribe un libro”.

La pluralidad de temas planteados por el nuevo Académico así como la melancolía provocada por la rememoración del tiempo pasado,

cuando el mundo era joven y lleno de sorpresas, ha provocado que la contestación a su discurso se me haya hecho realmente complicada. Por si fuera poco treinta y siete años después se produce una situación simétrica a nuestro primer encuentro: el año de su entrada en la RAI coincide con el de mi jubilación en la Universidad.

Finalmente he decidió afrontar el reto tratando de recordar con ustedes los polos de tensión que existían entre escuelas de pensamiento y entre los campos de teoría y práctica tal como yo los ví cuando Domínguez Abascal comenzó su andadura como investigador así como escribir algo de la historia de los temas que ha ido mostrando en su discurso.

El común denominador de todos ellos es la Dinámica que, según Lagrange *"est la science des forces accélératrices ou retardatrices, et des mouvements variés qu'elles doivent produire. Cette science est due entièrement aux modernes, et Galilée est celui qui en a jeté les premiers fondements"* (Mécanique Analytique. I, 221).

Yo pienso que en Dinámica los polos de tensión se han planteado siempre entre la experimentación con modelos físicos y la elaboración de los conceptos abstractos. Además la dinámica de sólidos ha estado históricamente ligada a la teoría del sonido. Ello nos permite retrotraernos 500 años antes de Jesucristo a los pitagóricos, fascinados por la regularidad de los intervalos que producen la armonía, y a su atrevida teoría sobre la "música de las esferas" originada por la vibración de los planetas. Aunque, ciertamente, la manifiesta claridad de ideas que se expone en el "Diálogo de las dos nuevas Ciencias" (1620) justifica la opinión de Lagrange, pues además de las vibraciones del péndulo se puede encontrar en las páginas 145, 146 y 147 del "Dia primero" la descripción premonitoria de los experimentos que Chladni llevó a cabo casi dos siglos después.

Tras Galileo se produce un cierto silencio en la ciencia *"...como si la naturaleza, recogida en sí misma, condensase todas sus energías en misterioso y sublime trabajo, preparándose para aquél aborto gigante que dio al mundo un Newton, un Descartes, un Leibnitz, un Euler o un Lagrange..."* (J. Echegaray. Discurso de ingreso en la Academia de Ciencias. 1866).

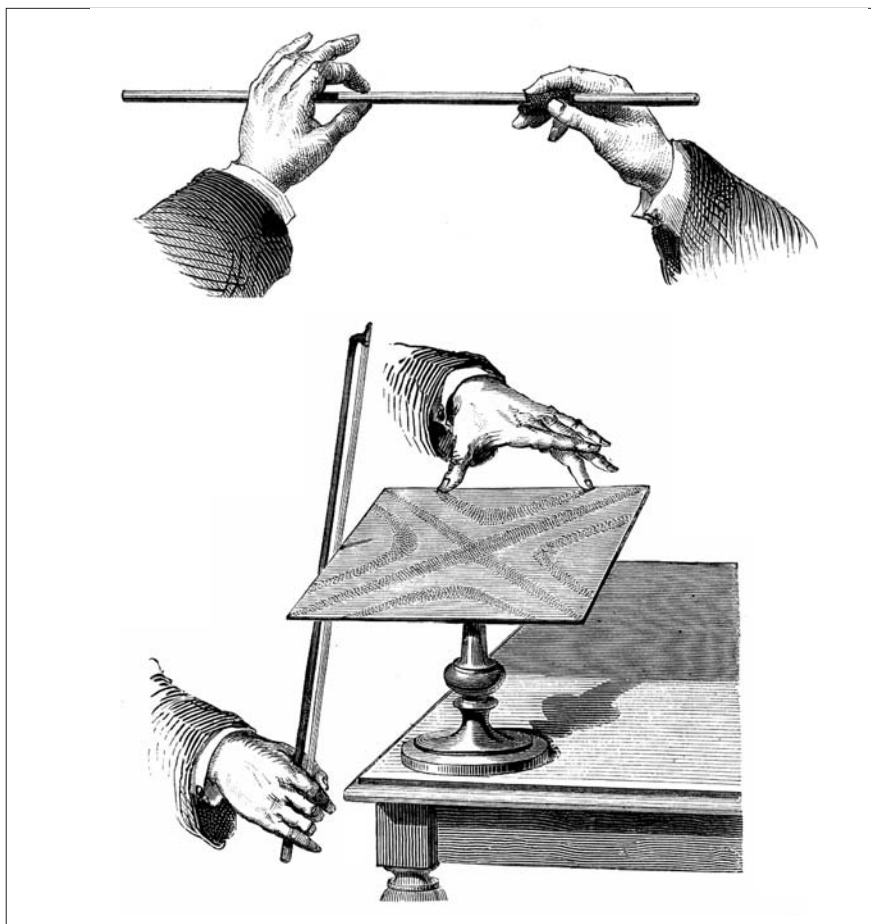


Figura 1. Generación de modos de vibración en varillas y placas.

El nuevo académico ha planteado ya el esfuerzo de los creadores del cálculo variacional y solo quisiera añadir la importancia que los experimentos de Chladni tuvieron para el desarrollo posterior. Con sus famosos “happenings” mostrando las vibraciones de placas y barras (figura 1) ante Napoleón, en 1809 dejó clara la falta de acuerdo con la teoría de Euler y concluyó acertadamente que esas diferencias entre teoría y práctica provenía de una falta de representatividad de los modelos matemáticos y de la ignorancia existente en geometría de superficies. Ello dio lugar al famoso concurso de la Academia (1811) que fue ganado al tercer intento por Sophie Germain, la primera mujer que aparece en los anales de la física matemática. Hasta 1872 no publicó Gauss su teoría de superficies que permitió clarificar años después las difi-

cultades que había encontrado Euler en el tratamiento de las vibraciones de campanas.

La línea de métodos aproximados empieza con Lord Rayleigh, quien publica en 1877 su extraordinaria "Theory of sound", sigue con Ritz en 1908, pasa a la literatura ingenieril a través de Timoshenko en 1910 y conecta finalmente con los métodos numéricos actuales favorecidos por la aparición de la computadora.

Otro impulso al estudio de las vibraciones vino desde el campo de la sismología. El análisis del gran terremoto de Basilicata de 1857 por Mallet y la invención por John Milne en 1892 de un sismógrafo fiable promovió que en los años finales de siglo (1895) se estableciese la comunicación sistemática entre los científicos de todo el mundo que disponían de sismógrafos, unos cuarenta, a los que en 1897 se sumó el Observatorio de la Marina de San Fernando en Cádiz.

Aunque, tal como ha indicado el profesor Domínguez Abascal, la existencia de ondas volumétricas P y S en un cuerpo infinito había sido demostrada por Poisson en 1831 y las de superficie en un semiespacio por Rayleigh en 1887, la evidencia experimental no llegó hasta 1890 cuando Oldham en Inglaterra y Wiechert en Alemania estudiaron los primeros sismogramas. Se observó entonces la aparición de aquéllas así como la de ondas largas L (undae longue) que contienen las ondas de Rayleigh, confinadas a moverse en el plano de propagación, pero también se descubrió que existían ondas LQ¹ actuando perpendicularmente.

En 1909 Mohorovicic propuso la existencia de una capa o corteza terrestre y poco después Love, en 1911, basándose en esa idea demostró la posibilidad de propagación de ondas transversales LQ en un semiespacio estratificado.

Como se ve, de nuevo la tensión teórico-experimental contribuyendo a la mejora del conocimiento.

Un avance decisivo para la ingeniería se produjo a partir de 1932 con el despliegue en California de acelerógrafos capaces de registrar aceleraciones fuertes cerca del epicentro, cuyos registros condujeron a la in-

vención del espectro de respuesta. Éste se ha convertido, como ha sido posible apreciar en la presentación del nuevo Académico, en un instrumento definitivo para la cuantificación ingenieril de la acción sísmica.

La continua mejora instrumental permitió a Hugo Benioff en 1957 poner a punto unos extensómetros mecánicos capaces de medir las mínimas deformaciones de la corteza en una caverna excavada en granito a 30 m de profundidad bajo el laboratorio de CalTech. Tres años después se producía el terremoto de Chile que alcanzó una magnitud de 9,5 según la escala de Kanamori lo que lo coloca como uno de los mas grandes, si no el primero, de los terremotos registrado instrumentalmente. El impacto fue tan descomunal que nuestro planeta estuvo oscilando durante un mes. Fue la ocasión en que las predicciones teóricas sobre el periodo de esa vibración, alrededor de una hora, en que la tierra cambia sucesivamente su forma de pelota de fútbol a pelota de rugby pudieron confirmarse con las medidas de CalTech².

Gracias a la tensión medida-experimentos la teoría pitagórica sobre la música de las esferas, que nunca se había olvidado³, se puede ahora confirmar en términos musicales para el caso de nuestro planeta, diciendo que ese período de 53'95 minutos de vibración terrestre podría describirse como el MI natural 20 escalas bajo el DO central.

Entramos ya en la etapa de la sismología cuantitativa, cuyo representante arquetípico es Keiiti Aki capaz en 1964 de calcular mediante sus modelos teóricos el llamado "momento sísmico" en el foco. A partir de entonces, como ha indicado el profesor Domínguez Abascal la aparición de la computadora permite afrontar formulaciones teóricas inimaginables previamente y contrastables con datos experimentales precisos, obtenidos mediante instrumentación cada vez más eficiente.

Es difícil explicar a las generaciones actuales la magnitud de esfuerzo de reacondicionamiento que, los que accedimos al mundo intelectual a finales de los 60, tuvimos que llevar a cabo para encontrar un camino en medio de la locura creciente de ideas nuevas y posibilidades técnicas así como la dificultad para encontrar bibliografía clave. De repente, por ejemplo, la aplicación práctica de temas tales como las ecuaciones integrales parecía algo asequible.

Es cierto que, desde Fredholm (1906), ya no se podía mantener que las ecuaciones de la elasticidad no pudieran integrarse. Otro excelente ingeniero sevillano Manuel Velasco de Pando, al escribir su libro “Elasticidad y Resistencia de los Materiales” (ref.22) comenzaba su capítulo XII “La solución general del problema elástico” con este aserto: *“Todo problema elástico conduce a una ecuación integral”* y en el prólogo a la primera edición de su libro profetizaba *“en lo sucesivo se irá recurriendo cada vez más a éstas (las ecuaciones integrales) para los casos importantes, a medida que los trabajos de los analistas simplifiquen su manejo”* y más adelante *“...la formación de grandes oficinas técnicas con especialistas dará tal vez en el porvenir la solución de la dificultad.”*

Lo cierto es que en el capítulo XII plantea la posibilidad de solución en cuerpos homogéneos e isotropos mediante potenciales de capa simple, estudia la solución de antena siguiendo a H. Weyl y analiza la discontinuidad de las integrales al atravesar el contorno.

Verdaderamente Velasco merece un re-análisis de su obra escrita. Su caso pone de manifiesto la perspicacia del análisis de Menéndez Pelayo que en 1894 ponía el dedo en la llaga al indicar que lo único que se veía claro en la historia científica de España era *“la falta de continuidad en el esfuerzo, grandes cantidades de trabajo perdido e invenciones que nadie desarrolla”* y a todo ello añadía *“...la falta de memoria nacional que hunde inmediatamente en la oscuridad al científico y a su obra”*.

La escuela rusa había iniciado la resolución de los problemas elásticos desde el planteamiento en variable compleja que en España eran conocidos fundamentalmente a través de la traducción al inglés de los trabajos de Muskhelishvili (ref.19) y sus imitadores ingleses Milne-Thomson y England pero la obra magna de Kupradze (ref.16) no se tradujo hasta 1979 cuando la fiebre computacional se había extendido hasta convertirse en epidemia.

Domínguez Abascal ya ha citado a algunos autores pero quisiera de nuevo, rememorar la situación en los términos que nos parecían más “avanzados” en aquel entonces. En métodos numéricos estaba disponible desde 1950 el completísimo tratado de Collatz (ref.7) que, cuando yo acabé la carrera en 1966 iba por la 2ª impresión de la 3ª edi-

ción; allí aparecía un capítulo VI dedicado a Ecuaciones integrales y funcionales.

Libros muy citados en las referencias pero difíciles de conseguir eran los de Kantorovich y Krilov (ref.14) y Finlayson (ref.10), este último dedicado al método de los Residuos Ponderados y finalmente, comenzó a popularizarse el método de los Elementos Finitos con el libro de su abanderado Zienkiewicz.

En España un estudio pionero fue el presentado en 1965 por los profesores de la Escuela de Caminos de Madrid Jimenez Salas y Arrechea (ref.13). Utilizando como solución fundamental la de Mindlin para carga vertical en el interior de un semiespacio, analizaban el hundimiento de un pilote en un terreno homogéneo e isótropo, simulado aquél como una línea de longitud constante, lo que conducía a una ecuación de Fredholm de primera especie. Algunos discípulos de Jiménez Salas, como Oteo (1972) y Zaballo (1974) prolongaron estas ideas a la deformación a flexión en lo que podría considerarse como la primera aportación numérica española a lo que ahora llamaríamos Método Indirecto de los Elementos de Contorno.

El avance imparable del método de los Elementos Finitos eclipsó en ese momento un área naciente: el uso de la identidad de Somigliana como fórmula de representación combinando potenciales de simple y doble capa y potenciales volumétricos. La ingeniería aeronáutica estaba utilizando la misma idea con lo que llamaban "Método de los Paneles" (ref.12). Finalmente, en 1975 apareció la publicación de Cruse y Rizzo (ref. 8) con aplicaciones en áreas de la mecánica muy diferente y con un capítulo de Lachat y Watson (ref.17) donde se utilizaban por primera vez las ideas de representación isoparamétrica de la geometría, las tensiones y los desplazamientos en el contorno para transformar los balbuceantes intentos anteriores en un verdadero Método computacional polivalente y sistemático.

El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Southampton era, en ese momento, un hervidero de ideas relacionadas con los temas de dinámica, láminas estructurales, Elementos Finitos y métodos numéricos en general, donde un investigador emergente, Carlos

Brebbia, autor de un libro sobre Elementos Finitos, (el primero en ser traducido al castellano por quien les habla) (ref.4), supo ver las enormes posibilidades que se abrían y, en el marco de la tensión competitiva con la Universidad de Gales, donde trabajaba Zienkiewicz, intentó desarrollar una línea propia investigación.

Precisamente en esa época quien les dirige la palabra llegaba destinado a la Escuela de Ingenieros de Sevilla con una beca de la Fundación March para estudiar la interacción dinámica entre la estructura de sostenimiento y el terreno circundante en túneles sometidos a carga sísmica. La idea era utilizar un método semejante al de Chopra (ref.6) para presas, en que la matriz de rigidez del medio se construía dando movimientos unidad a los nudos de los bordes del semiespacio representativo del terreno. Al observar algunas soluciones elegantes publicadas por la escuela rusa tuve la esperanza de poder aplicar el método de Mushelishvili y sobre ello organicé mil primer seminario de verano en la escuela de Sevilla en el que intervino, ya como doctorando, el brillante alumno que hoy ha sido investido como nuevo académico. Descubrimos entonces la posibilidad de generalizar una solución analítica de Muskhelishvili sobre un tema totalmente distinto al anterior que, además, era aplicable a algunos problemas prácticos y ello fijó el título de la tesis doctoral. La visita como profesor invitado de Carlos Brebbia y la posterior estancia del profesor Domínguez Abascal en Southampton cambió y clarificó las líneas de investigación de nuestro emergente grupo.

En efecto, en los pocos meses que el nuevo Académico estuvo allí fue capaz de poner en marcha un programa de ordenador, basado en el nuevo método, (cosa que los investigadores de Southampton llevaba años intentando conseguir sin ningún éxito), contribuyó en un elevadísimo porcentaje a la publicación del primer libro en inglés (ref.5) sobre el que ahora pasó a llamarse, Método de los Elementos de Contorno, publicó sus primeros artículos y regresó totalmente inoculado con el virus de la competitividad investigadora al haber asistido en algunos congresos internacionales a las luchas inter-universidad a que me he referido más arriba.

A la vuelta a Sevilla el título de su tesis se mantuvo pero ahora descompuesta en dos mitades que reflejaban la transmutación al nuevo orden: la inicial puramente analítica con el método de variable compleja

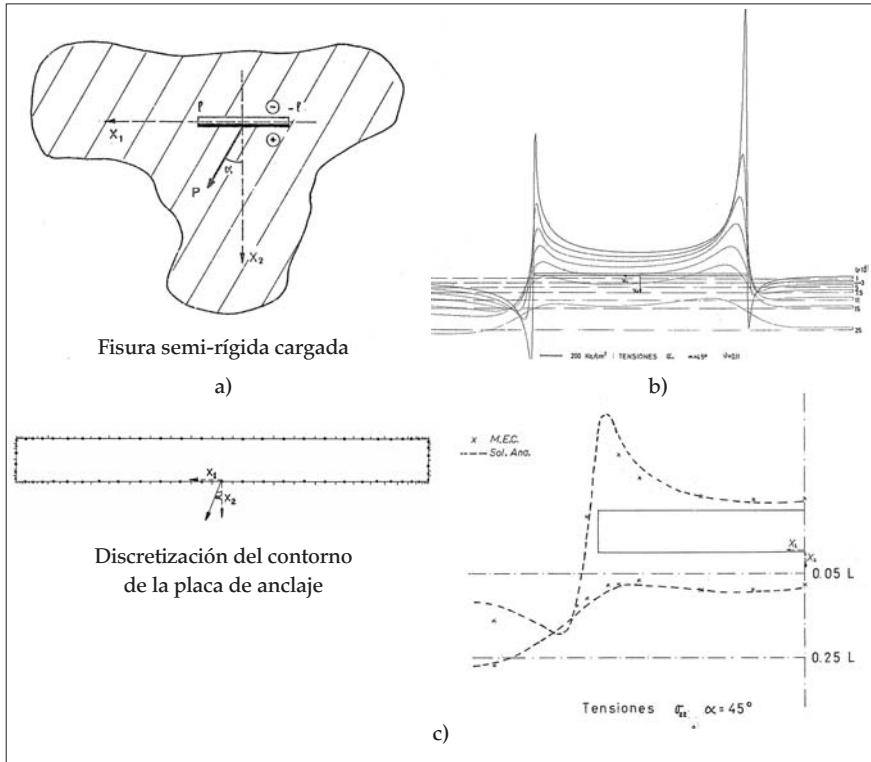


Figura 2. Tensiones en cabezas de anclaje: a) modelo a estudiar, b) resultados de variable compleja, c) comparación con B.E.M.

y la segunda con la primera aplicación en España del Método Directo de los elementos de contorno, nombre que se empleaba por primera vez tanto en nuestro idioma como en la literatura técnica internacional.

Trajo también algunos interrogantes que presentaba el método y sobre ellos establecimos una línea de trabajo que permitió a los miembros del grupo acudir sistemáticamente a los congresos internacionales, contribuir al desarrollo del nuevo método y participar en esa tensión creativa inducida por la competencia entre universidades y sus líneas de trabajo.

Desgraciadamente, en aquella época, no dábamos importancia a los artículos y, en lugar de publicitar internacionalmente los resultados de la Tesis, nos limitamos a enviarlos a un congreso nacional y a una revista con repercusión de tipo práctico-profesional (ref. 9) donde pasaron desapercibidos. Para hacerlos inmortales he incluido en la figura 2 una breve muestra de los dibujos originales.

Por si fuera poco Domínguez Abascal obtuvo una beca Fullbright en M.I.T. donde, de nuevo, se encontró inmerso (en el tema de interacción terreno-estructura que ha escogido como título para su discurso), en la competencia entre dos polos de investigación por otro lado admirables: Berkeley y el propio M.I.T.

En este caso su estancia fue más larga y en ella disfrutó de la tutela del profesor José Rössset, uno de nuestros Académicos correspondientes y miembro de la Academia USA de Ingeniería. La importancia de Rössset en el campo del cálculo dinámico y la ingeniería sísmica es conocida y apreciada en todos los ámbitos internacionales desde la lectura en 1964 de su tesis doctoral en M.I.T.

Pido disculpas de nuevo por referirme ahora a mi propia actividad para intentar reflejar mi opinión sobre los conocimientos del tema que había disponibles en nuestro país a finales de los 60. Mi jefe en la Subdirección de Estudios y Obras Nuevas de RENFE, donde yo trabajaba desde que acabé la carrera, me encargó en 1968 estudiar la posibilidad de incrementar la intensidad de tráfico y las cargas por eje en la línea de ferrocarril Silla-Cullera que está construida sobre terrenos saturados y poco consolidados. Me vi enfrentado así por primera vez a un problema de interacción dinámica entre las cargas móviles, la superestructura de la vía y un terreno muy complicado de modelar, donde, con los recursos actuales, sería interesante medir e interpretar si se produce la inestabilidad descrita en su comunicación por el nuevo Académico.

La documentación más asequible de que se disponía en aquella época en España eran los libros de la escuela rusa destinados al proyecto de cimientos de las grandes máquinas que la revolución soviética necesitaba para su industrialización. Entre ellos el que tenía un enfoque más riguroso era el de Barkan (ref.3) traducción revisada de una obra en ruso de 1948.

Conseguí encontrar también en el Laboratorio de Mecánica del Suelo del CEDEX, una obra de 1953 que había pasado desapercibida (ref.2) sobre ensayos dinámicos en suelos, donde descubrí la depuración que Quinlan y Sung habían realizado sobre la teoría de Reissner, descrita por profesor Domínguez Abascal, lo que hacía recuperar la confianza

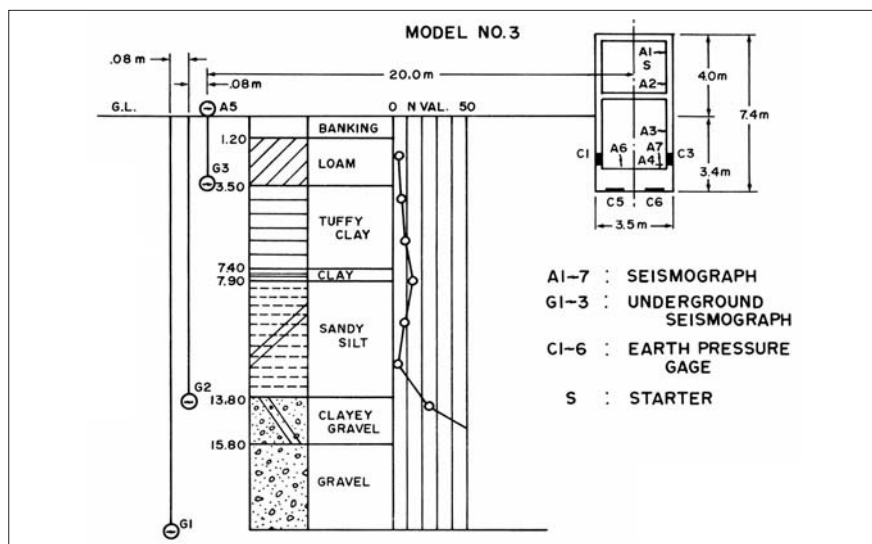


Figura 3. Ensayos en modelo reducido de edificios de contención.

en el modelo analítico representativo de los viejos resultados de la DE-GEBO para cimientos de máquinas. Lysmer, que luego sería protagonista en la pugna Berkeley- M.I.T había utilizado esas soluciones para mejorarlas y leer en 1965 su tesis doctoral, alguno de cuyos resultados pude estudiar en la ref.18. Posteriormente Kuesel desarrolló en 1969 (ref.15) un modelo de interacción terreno- estructura basado en la propagación de ondas que se aplicó al proyecto del metro que atraviesa la bahía de San Francisco y finalmente Anil Chopra, entonces aspirante a conseguir su “tenure” en Berkeley, lanzaba el método al que me he referido antes (ref.6). En medio de los esfuerzos por asimilar esas ideas y arrollado por la necesidad imprescindible de usar la computadora, cosa que entonces no era tan sencilla, la aparición en 1970 del magistral libro de Richart y otros (ref.20) me permitió clarificar la situación.

En el tema que da nombre al discurso del nuevo Académico esa actividad científica en las Universidades USA, de la que sólo destellos llegaban a España, iba a sufrir un impulso definitivo tras el esfuerzo llevado a cabo en la segunda mitad de los 60, cuando se produjo el “boom” constructivo de las centrales nucleares.

De nuevo un experimento (figura 3; ref.1) planteaba un tema muy importante: la falta de concordancia entre los resultados obtenidos con

modelos físicos de edificios de contención muy rígidos semi-empotrados en el terreno y los cálculos realizados sin tener en cuenta la interacción terreno-estructura. Lo mas estupendo para los constructores era la reducción de solicitudes, y por consiguiente de coste, a que un método de cálculo correcto podría conducir.

La lucha para conseguir los fondos de investigación de la National Science Foundation y el beneplácito de la Nuclear Regulatory Commission acentuó las rivalidades entre las Universidades de las costas Este y Oeste de Estados Unidos llenas de personalidades extraordinarias e investigadores emergentes (como los que ha citado el nuevo Académico en su intervención) y la competencia de todos ellos entre sí.

Massachussets se adelantó organizando en 1969 un seminario de tres días sobre “Seismic design for Nuclear Power Plants” que dio lugar a la referencia 11, en la que se encuentra una magistral contribución de nuestro compañero Röesset (ref.21). Domínguez Abascal y yo mismo asistimos en 1976 a otro seminario en Berkeley donde se discutieron los “Recent Advances in Earthquake Resistant Design of Structures” en los que, además de conocer personalmente a las grandes y admiradas figuras que él ha citado, fuimos testigos de la enorme tensión que existía entre los grupos de Mecánica de Suelos y Cálculo de Estructuras de la propia Universidad de Berkeley y, en particular, entre los diferentes enfoques de Chopra y Lysmer lo que no impedía que ninguno de ellos se privase de lanzar su diatriba sobre el enfoque que daba M.I.T. a los contornos absorbentes, la diferencia entre interacción cinemática y dinámica o las ventajas del método directo frente al de los tres pasos al que, paradójicamente, Lysmer había contribuido a asentar sobre firmes bases al comienzo de su carrera (ref.18).

Un año después, como he dicho, el nuevo Académico llegaba a M.I.T. y participaba activamente en el debate global publicando con Röesset los informes que ha citado en su presentación, en los que utilizaba su dominio del Método de los Elementos de Contorno para arrancar una línea de investigación a la que no ha dejado de contribuir desde entonces . El método ha sido aplicado por él y sus discípulos a temas tan variados como Mecánica de la Fractura, medios Poroelásticos, propagación del sonido, etc. y sus correlativas aplicaciones en problemas in-

genieriles según se observa en los espectaculares ejemplos que ha mostrado.

También, como ha puesto de manifiesto su extraordinaria presentación, ha organizado un equipo capaz de llevar a cabo medidas in situ para contrastar sus modelos, lo cual por sí sólo demuestra su versatilidad y capacidad de trabajo. El profesor Domínguez Abascal es ahora una referencia en el mundo internacional del comportamiento dinámico de suelos y estructuras y su influencia se mantiene a través de los dos libros publicados en USA y UK, y de las más de doscientas publicaciones de investigación, la mayoría de ellas en revistas internacionales.

No quisiera terminar este apartado sin dedicar unas palabras a dos trabajos en que tuvimos ocasión de colaborar a pesar de la distancia geográfica (todavía no se había construido el AVE Madrid-Sevilla) que ponen de manifiesto la desesperante idiosincrasia de algunas empresas españolas que sólo acudían a nuestra Universidad en casos absolutamente límite.

La primera se refiere a una gran consultora española que estaba inmersa en el proyecto de centrales nucleares y a la que su asociada norteamericana había cedido el uso de un programa de ordenador (Ref.24) para los estudios de interacción terreno-estructura. Sólo se les ocurrió venir a pedir ayuda cuando, al romperse la alianza, los norteamericanos retiraron la autorización del programa y ellos se vieron forzados a terminar los cálculos, sin un instrumento imprescindible, en un plazo cortísimo. Utilizando las sinergias de nuestros dos grupos (¡y mediante un trabajo descomunal!) fuimos capaces, en el plazo de tres meses, de prepararles un programa adecuado a sus necesidades que, además nos permitió a nosotros extenderlo para el desarrollo de varias tesis doctorales y para publicar en las mejores revistas.

El segundo caso les va a permitir comprender por qué el nuevo Académico ha tenido que exponer una presa extranjera para ejemplificar los problemas de interacción múltiple agua, estructura, suelo. Ahora fue una gran empresa eléctrica quien había sido urgida por la Junta de Energía Nuclear para demostrar, por razones obvias, la resistencia sísmica de una gran presa bóveda que se encuentra aguas arriba de una

Central Nuclear española. En la discusión técnica, cuando les hicimos ver los fallos de su planteamiento dinámico prefirieron encargar el trabajo a un profesor de Berkeley, cuyo método era muy inferior al utilizado por el profesor Domínguez Abascal.

Aquél profesor californiano, para con quien entonces ya me unía una cierta amistad, llamó para preguntar qué estaba pasando y fue realmente penoso observar la desconfianza de ciertas empresas españolas y el provincianismo de algunas administraciones públicas para reconocer la capacidad de los grupos de la Universidad española a la que con sus impuestos y fondos de investigación contribuyen a mantener. Para cerrar la historia adecuadamente poco después el profesor de Berkeley aludido modificó su teoría incorporando la del nuevo Académico.

Estas historias me permiten comenzar los comentarios a la segunda idea del discurso del profesor Domínguez Abascal: la sociedad tecnocientífica.

Yo creo que, en España, el primer factor de importancia en la situación actual de la investigación universitaria en ingeniería es su juventud. Si la ciencia, como base del conocimiento ingenieril, se incorporó prácticamente al mismo tiempo que en el resto de Europa (y, de hecho, ocasionó la creación de las primeras escuelas de ingeniería), la obligación de llevar a cabo investigación sistemática ideada por Humboldt en la Universidad de Berlín, tal como cuenta Domínguez Abascal, para conseguir el perfeccionamiento tanto moral como profesional de profesores y alumnos, llegó a nuestras Escuelas con 150 años de retraso con el llamado Plan 57 que introducía la Tesis Doctoral y la dedicación exclusiva de los profesores. Reforma no promovida desde ellas mismas como deseo de actualización, sino ordenada desde los poderes públicos. Ciertas especialidades (aeronáuticos, telecomunicación, etc.) no tuvieron que hacer grandes esfuerzos de adaptación. En otras el proceso ha sido largo y complicado y periódicamente afloran dudas sobre la propia identidad y sobre el balance de pérdidas y ganancias del nuevo orden.

Existe también un problema que, de nuevo, no es el mismo para todas las especialidades de ingeniería. Evidentemente, con la reforma de las enseñanzas técnicas, el legislador pretendía potenciar la colaboración

entre universidad-industria-gobierno que ha conducido a la llamada revolución tecnocientífica.

A lo largo de estos años me ha parecido observar una falta de entendimiento entre Universidad e Industria, achacable a ambos y debida a la visión de aquélla como centro cuya única misión es la transmisión del saber a las generaciones futuras. A ello se añade la despreocupación de algunos investigadores universitarios por los problemas cotidianos de las empresas, entre los que no es el menor la necesidad de respetar los plazos de finalización de los trabajos.

Este desconocimiento mutuo ha tenido como mínimo dos efectos perversos: por un lado la realización en la Universidad de estudios industriales de corta repercusión intelectual y temporal, y por otro el encargo a Universidades extranjeras, de fama afianzada, de los trabajos de mayor enjundia. Como en el ejemplo descrito más arriba, este último efecto se ve acentuado por el prestigio que, ante los responsables políticos, tiene paradójicamente el encargo a universidades extranjeras.

Se ha comenzado a romper este círculo de incomunicación, pero eliminarlo completamente exigirá perseverar en el esfuerzo durante mucho tiempo, especialmente en las especialidades más antiguas de la ingeniería donde la desconfianza hacia el sistema de investigación universitaria viene, en ocasiones, desde las propias Escuelas y Colegios profesionales.

La implantación del Espacio Europeo de Educación Superior está también sacudiendo la estructura no sólo de la enseñanza sino de la organización del sistema de ingeniería. Algunos eslóganes de sus defensores son especialmente fatigosos como el que ridiculizaba el gran ingeniero mexicano, premio Príncipe de Asturias, Emilio Rosenblueth (ref.22): *“Tanto se ha insistido en la necesidad de aprender a aprender que algunos educadores claman que ha llegado el momento de, no sólo aprender a aprender, sino de aprender algo. Bien entendido, no hay contradicción entre los dos propósitos. La mejor manera de aprender a aprender es aprendiendo un tema concreto en profundidad”*.

Mi experiencia como profesor no puede estar más de acuerdo con esta afirmación, pues el conocimiento profundo de un tema amplía la cu-

riosidad por analizar sus límites así como su aplicabilidad a problemas ingenieriles. Creo que la ejecutoria del nuevo Académico y la de todos los jóvenes investigadores de éxito que he visto formarse y crecer avalan este diagnóstico.

Permítanme ahora resumir la ejecutoria universitaria del profesor Domínguez Abascal. Como dije es Ingeniero Industrial (1975) y Doctor Ingeniero Industrial (1977) por la Universidad de Sevilla. Becario postdoctoral Fulbright en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) durante 1977 y Research Associate, también en MIT en 1978. A su vuelta a España y tras sendas estancias en la Universidad Politécnica de Madrid y en su Alma Máter obtuvo en 1981, a los 27 años, la plaza de Profesor Agregado en la Universidad de Las Palmas de Gran Canarias y, finalmente en 1982 la Cátedra en la de Sevilla. Durante todo este tiempo ha dirigido 16 tesis doctorales de las que cinco de sus autores son actualmente Catedráticos y otros cinco Profesores Titulares en diferentes Universidades. Tres de sus discípulos actúan en la empresa privada en EEUU, Venezuela y España, mientras que los tres restantes están arrancando su carrera como investigadores.

A esta brillante trayectoria investigadora y docente se suman las labores de gestión en cargos de responsabilidad. En efecto, Domínguez Abascal ha sido Vicerrector de la Universidad de Sevilla (1990-1992) y Director de su Escuela de Ingenieros (1993-1998). Este último cargo merece un comentario especial, pues durante esa etapa tuvo a su cargo el traslado de la Escuela de Ingenieros de Sevilla, desde su antigua sede en la calle Reina Mercedes, a la isla de La Cartuja, con todo lo que ello significa de gestiones para conseguir el edificio, los presupuestos de restauración y la construcción de sus modernos laboratorios. Sin hablar del continuo ejercicio de sus capacidades diplomáticas para conseguir que no se ocasionaran roturas irreversibles de relaciones personales durante el traslado y la inevitable redistribución de espacios .

Su capacidad de trabajo le permitió simultáneamente actuar como consultor en problemas de ingeniería interesantes por sí mismos, por su interés social o por su representatividad cultural, de lo que tres buenos ejemplos son sus estudios relacionados con las estructuras vela-

rias del Palenque en la EXPO 92, el estadio del Real Betis o la restauración mecánico-estructural del Giraldillo de la Catedral.

En todas estas empresas el nuevo Académico ha mostrado sus virtudes entre las que me gustaría resaltar su trabajo sistemático, la brillantez y aparente simplicidad de sus soluciones, la capacidad de análisis y crítica constructiva de los temas y, last but not least, su capacidad para aunar voluntades y crear equipo con personas muy inteligentes.

Estas cualidades fueron las que atrajeron la atención de los responsables de la Junta de Andalucía que, al llamarlo en 2004 para ofrecerle la Secretaría General de Universidades, Investigación y Tecnología, provocaron un cambio de trayectoria de la que salió beneficiado todo el país ya que sus intervenciones ante las autoridades del Estado impidieron, la toma de algunas decisiones improvisadas y equivocadas.

En mayo de 2008 José Domínguez añadió una nueva faceta a su polivalente experiencia aceptando el cargo de Secretario General Técnico de Abengoa, cargo dependiente directamente de su Presidente. Desde este puesto, que en términos internacionales podríamos catalogar de CTO, se ocupa de los aspectos técnicos y de I+D de la compañía. Continúa además manteniendo una pequeña dedicación parcial a la Cátedra de Estructuras de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. En Abengoa su polo de atracción son los desarrollos en grandes instalaciones para energías renovables por todo el mundo y no hace falta ser muy clarividente para predecir que alcanzará los éxitos a que conducen su inteligencia, perseverancia y capacidad de trabajo.

Entre los reconocimientos públicos a su actividad merece citarse el Premio Nacional de Investigación en Ingeniería “Leonardo Torres Quevedo” entregado por S.M. el Rey en 2004 y el Premio Nacional de Restauración de Bienes Culturales en 2006 como parte del equipo del IAPH.

Es miembro, de la Academia Europaea en su sección de Física e Ingeniería y de la Real Academia Sevillana de Ciencias, así como Fellow of the American Society of Civil Engineers (ASCE).

Tras esta descripción estarán ustedes de acuerdo en que su elección, hace un año, como miembro de la Academia no podía estar más justificada tanto por *“haber realizado aportaciones de destacada importancia en materias teóricas y aplicadas vinculadas a la ingeniería, reflejadas en publicaciones del pertinente nivel”* (Artículo 6 de los Estatutos RAI) como por su *“eficacia en la dirección de empresas e instituciones, mostrando capacidad... para afrontar y resolver problemas nuevos o complejos así como la prestación de servicios relevantes para la docencia y formación de ingenieros”* (Art. 7. Méritos Adicionales).

Domínguez ha pasado él mismo a conocer desde dentro la Universidad, la Administración Pública y la Empresa privada, por lo que su próximo desafío consistirá en armonizar esas desavenencias que hemos comentado entre las de las tres ramas que deben contribuir al progreso del país.

Creo que además de sus virtudes personales hay tres razones que provocan los éxitos de José Domínguez Abascal: en primer lugar su capacidad para escoger temas y equipos. También su esfuerzo continuado, incluso en vacaciones⁴. Finalmente habría que decir que duerme poco. Me explicaré, porque esto último viene de lejos.

Recuerdo que al llegar destinado a la Escuela de Sevilla su entonces Director, nuestro compañero y Vicepresidente, el Académico Aracil, (quien en aquella época peleaba a brazo partido para conseguir que otras especialidades de la Escuela de Ingenieros progresasen en su trayectoria universitaria como había hecho la suya propia), se apresuró a presentarme al actual Académico que estaba decidido a iniciar su carrera universitaria desde el entusiasmo desatado por su posición de primero de la promoción, así como a uno de sus compañeros de la misma, el hoy Catedrático Antonio Martín Navarro, cuyas habilidades computacionales lo habían convertido en el amo dominante de la fabulosa IBM 1130 de 8 K con la que nos creíamos los reyes del mundo.

Los tres trabajábamos a todas horas y por ello conseguí convencer al señor Director de la necesidad de adquirir un plotter que nos evitase tener que dibujar con estrellitas, puntitos y rayitas. Finalmente la trazadora llegó justo el día que habíamos conseguido simular un terre-

moto, con lo que pueden imaginar la subida de bilirrubina que experimentamos cuando la pluma empezó a dibujar el acelerograma. Supongo que el profesor Aracil recordará todavía la carrera que me dí desde el L3 hasta su despacho de Dirección con el corazón saltándome en el pecho y repitiéndole entusiasmado aquello de “je vous l’avait bien dit !”.

El nuevo Académico estaba también entusiasmado pero no ahító, por lo que propuso quedarse esa tarde hasta que resistiéramos, para expresar cuanto antes las posibilidades del programa de simulación que habíamos compuesto.

La historia se terminó cuando, seguramente desconfiando del motivo alegado para no estar con ellas, sus novias aparecieron en el L3 a altas horas de la noche con el pretexto de traernos algún alimento.

José, no pierdas nunca tu curiosidad inquisitiva y tu optimismo vital.

Bienvenido a la Academia.

Referencias

- K. Akino, T.O.Ota, H.Yamada: "Seismic observation of rigid structures on various soils and its review". Proc. 4th. World Conf.on Earth.Eng. Chile 1969.
- A.S.T.M.: "Symposium on dynamic testing of soils" N° 156. 1983.
- D.D.Barkan: "Dynamics of bases and foundations" McGraw Hill 1962
- C.A. Brebbia, J.J. Connor: "Método de los elementos finitos en la ingeniería civil" College. Ing. Caminos 1975.
- C.A. Brebbia: "The boundary element method for engineers". Pentech Press 1978.
- A. Chopra: "Earthquake response of concrete gravity dams" ASCE. Eng. Mech. Division (8) 1970.
- L. Collatz: "The numerical treatment of differential equations" 2^a impresión de la 3^a edición. Springer 1966.
- T.A. Cruse, F.J. Rizzo "Boundary-Integral Equation Method: Computational Applications in Applied Mechanics" ASME 1975.
- J. Domínguez, E. Alarcón: "determinación de las tensiones en cabezas de anclaje". Hormigón y Acero n° 130, 131, 132. 1979.
- B.A. Finlayson: "The method of weighted residuals and variational principles" Academic Press 1972.
- R.J. Hansen: "Seismic Design for Nuclear power Plants". M.I.T. Press 1970
- J.L. Hess: "Calculation of potential flow about bodies of revolution having axes perpendicular to the free-stream direction". Journal Aerospace. Science. 1962.
- J.A. Jiménez-Salas; J. Arrechea: "Résolution théorique de la distribution des forces dans les pieux" Sixth Int. Conf. ISSMFE. Montreal 1965.
- L.V. Kantorovich; V.I. Krilov: "Approximate methods of higher analysis" Noordhoff. Groningen 1958.
- T.R. Kuesel: "Earthquake design criteria for subways" ASCE. Jour. Struct. Div. 95 (6) 1969.
- D. Kupradze: "Three-dimensional problems of the mathematical theory of elasticity and Thermoelasticity". North-Holland 1979.
- J.C. Lachat, J.O. Watson: "A second generation boundary integral equation program for three-dimensional elastic analysis". En referencia n° 8.
- J. Lysmer; F.E. Richart: "Dynamic response of footings to vertical loading". Proc. ASCE Jour. Soil Mech. (92) 1966.
- N.I. Muskhelishvili: "Some basic problems of the mathematical theory of elasticity" Noordhoff. Groningen. 1953.
- F.E. Richart; J.R. Hall; R.D. Woods: "Vibration of soils and foundations" Prentice Hall 1970.
- J.M. Rösset: "Fundamentals of soil amplification" en referencia n° 10.
- E. Rosenbluth: "Sobre la finalidad de la educación". Revista CONAII 1979
- M. Velasco de Pando: "Elasticidad y resistencia de los materiales". Dossat 1946.
- Wong y E. Luco: "Dynamic response of rigid foundations of arbitrary shape" Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (4) 1976.

Notas

¹ La Q viene de la palabra alemana QUERWELLE , literalmente “ONDA TRANSVERSAL”.

² Los extensómetros de Benioff eran tan sensibles que durante el día no podían utilizarse debido al tráfico y a las propias operaciones que se desarrollaban en el laboratorio, que ahogaban cualquier señal enviada por el planeta tierra . Por la noche, como el laboratorio estaba en las colinas del oeste de Pasadena, lejos de la ciudad y de las carreteras, el ambiente era más tranquilo y los instrumentos podían recolectar datos útiles. Benioff notó, sin embargo, que algunas noches aparecían niveles inesperadamente altos de ruido. Finalmente comprendió que quienes habían descubierto también la quietud de los alrededores eran las parejas. Frank Press, el indignado director del laboratorio, propuso establecer un sensor que, cuando identificase cierto tipo de vibraciones, encendiese todos los focos del solitario camino de acceso. Sin embargo, la junta de gobierno optó pudorosamente por una medida más sencilla y efectiva: instalar una cadena de cierre al comienzo de aquel.

³ “There’s not the smallest orb wich thou behold’st
But in his motion like an angel sings,
Still quiring to the young-eyed cherubins;
Such harmomy is in inmortal souls;
But, whilst this muddy vesture of decay
Doth grossly close it in, we cannot hear it”
(El Mercader de Venecia, V.1)

⁴ Aquí quizá sigue resonando la frase paterna “. José, ¿ya te lo sabes todo?”.

